

Mitteilungen aus dem  
**Institut für Maschinenwesen**  
der  
Technischen Universität Clausthal  
**Nr. 25**

(November 2000)

**Herausgeber:**

Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz

**Redaktion und Layout:**

Dr.-Ing. Günter Schäfer  
Dipl.-Ing. Hagen Birkholz  
Dipl.-Ing. Martin Garzke

**Anschrift:**

Institut für Maschinenwesen  
Technische Universität Clausthal  
Robert-Koch-Str. 32  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld  
Tel: (0 53 23) 72-22 70  
Fax: (0 53 23) 72-35 01  
E-Mail: [info@imw.tu-clausthal.de](mailto:info@imw.tu-clausthal.de)

ISSN 0947-2274

**Titelbild:**

Das Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen führt u.a. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Maschinenakustik und der Lärminderung durch. Das Titelbild stellt die Frequenzverteilung des bekannten Weihnachtsliedes "Oh Tannenbaum" über der Zeit dar.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>1</b>
Dietz, P.: 225 Jahre Lehre und Forschung in Clausthal – die Geschichte unserer kleinen Universität .....	3
<b>Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen</b>	
Garzke, M.: Modell zur Beschreibung von Passverzahnungen bei schwingungsdynamischen Untersuchungen .....	15
Grünendick, T.: Löten in der Luftfahrtindustrie .....	19
Schäfer, G.: Gleichmässigkeit zur Leistungssteigerung .....	23
Müller, D.: Berechnungen mit der externen FEM-Approximation nach Apanovich .....	25
<b>Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung</b>	
Große, A.: Methodische Ansätze zur Werkstoffauswahl .....	29
Klemp, E.: Der Einfluss des Rapid Prototyping auf den Produktentwicklungsprozess .....	33
Heimannsfeld, K.; Pawar, K.; Ratchev, S.; Struck, T.: Ein modularer Prozess als Grundlage eines wissensbasierten Systems im Anforderungswesen .....	37
Goltz, M.: Collaborative Product Development in a Distributed Engineering Environment .....	43
Grünendick, T.; Trenke, D.: Herstellung von Faserverbundbauteilen in Rapid Tooling Formen.....	51
Beisheim, N.: Anforderungen von VirtualReality als Entwicklungswerkzeug an den Produktentstehungsprozess und seine Datenstrukturen .....	59
Düsing, C.: Towards the emerging Systems Engineering data exchange standard – AP233.....	65
Käferstein, B.: CAD-Schnittstellen: Wenn dem Konstrukteur mehr abgeschnitten wird, als ihm lieb ist.....	71
Heimannsfeld, K.; Müller, D.: Requirements Engineering Knowledge Management based on STEP AP233.....	73
Beisheim, N.: Entwicklung eines Informationssystems für präventive Sicherheitsanalysen an Maschinen und Anlagen.....	79
Trenke, D.: Konstruktionsregeln für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung von Werkzeugen und Prototypen.....	85
<b>Experimentelle Methoden und messtechnische Untersuchungen</b>	
Mupende, I.; Otto, St.: Windentrommeln auf dem Prüfstand .....	91

Tawil, M.: Lebensdauerprüfung von Gelenkwellen.....	95
Käferstein, B.: Gray correlation of speckled high resolution images: an approach to precise deformation measurements with MATLAB.....	99
Birkholz, H.; Garzke, M.: Prüfstandskonzept zur mechanischen Bauteilprüfung.....	105
Trenke, D.: Infiltration von lasergesinterten Bauteilen.....	111
Mupende, I.; Otto, St.: Experimentelle Beanspruchungsanalyse an einer Hubwinde .....	115
<b>Maschinenakustik</b>	
Käferstein, B.: Fügestellendämpfung in Feinblechkonstruktionen .....	119
Gummersbach, F.: Schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten.....	123
Backhaus, S.: Lärminderung setzt an der Quelle an - Schallquellenidentifikation mit Hilfe der Ordnungsanalyse.....	133
<b>Verfahrenstechnische Maschinen und Anlagen</b>	
Bönig, S.; Grünendick, T.: Sicherheitsanalyse einer Reaktionsschwingmühle .....	137
Birkholz, H.; Große, A.: Buchveröffentlichung zum Sonderforschungsbereich 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“ .....	145
<b>Institutsbetrieb</b>	
Schäfer, G.; Wächter, M.: Intensivstudienprogramm Maschinenbau an der TU Clausthal .....	147
Tawil, M.: 3D-CAD-Praktikum mit Pro/ENGINEER® .....	151
Düsing, C.: Über einen Praktikumsaufenthalt zweier Auszubildender des Lehrberufes Fachinformatiker/Anwendungstechniker.....	153
<b>Hochschule und Kontakte</b>	
Dietz, P.: Ist der Computer ein Oberharzer?.....	157
Betaneli, A.: Verallgemeinertes Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern.....	163
Rusek, P.; Tajonar, H. A.: GAP Analysis in Flanged Unions .....	169
<b>Ausstattung etc.</b>	
Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes.....	175
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1996.....	178
Autoren .....	181

## Vorwort

Mit dieser Ausgabe der Institutsmitteilungen feiern wir ein kleines Jubiläum. Nachdem mein Vorgänger Prof. Kuske anfangs der 70er Jahre in unregelmäßigen Abständen die Hefte 1 bis 9 herausbrachte und ich dies im Jahre 1981 mit Heft 10 fortsetzte, konnten wir ab 1988 die Serie jährlich erscheinen lassen und legen Ihnen jetzt die Mitteilung Nummer 25 vor. Wenn man die Ausgaben durchblättert, merkt man nicht nur, wie sich die Technik und die Probleme der Industrie rasant geändert haben, man sieht auch, wie das Institut und seine Mitarbeiter jährlich vor neue Herausforderungen gestellt werden, die geradezu sprunghaft die früher sorgsam voneinander abgegrenzten Sachgebiete überschreiten und verbinden – ein Zeichen, daß wir auch bei der Erziehung unseres Ingenieurwachstums umdenken müssen.

Am Anfang dieser Ausgabe steht ein Befreiungsschrei: Nach vierjähriger Amtszeit als Rektor habe ich dieses Amt meinem Nachfolger, Herrn Prof. Schaumann von der Organischen Chemie übergeben. Ich darf mich also wieder dem Tragfähigkeitsverhalten und dem Verschleiß an Maschinenelementen widmen statt diese an Politikern und Kollegen zu erproben. Und was das Schönste an der ganzen Sache ist: Ich finde nach meiner „Abwesenheit“ ein in Lehre und Forschung gut funktionierendes und gut zusammenarbeitendes Institut vor – Dank den treuen Seelen, die sich so aufopferungsvoll für das IMW eingesetzt haben. Da wäre besonders Martina Wächter zu nennen, die nicht nur in bewährter Weise die Studenten samt ihren Übungen im Griff hat, sondern sich auch unermüdlich um eine Neustrukturierung der Studien, insbesondere des Intensivstudienprogramms Maschinenbau bemüht. Günter Schäfer hat die Aufgabe hervorragend bewältigt, das Institut samt Gebäude, Einrichtung, Forschung und Personal auf einem hohen Stand zu bewahren (und dabei seine Kneipe nicht zu vernachlässigen). Und nicht zuletzt Frau Kurz, die mit eiserner Hand alle andern im Griff hatte und für die ich jetzt wahrscheinlich nur ein neuer Störfaktor bin. Dank aber auch allen anderen, die sich bei der Abwicklung des SFB oder COPES, bei der Drucklegung des Abschlußbuches oder bei Kongressgestaltungen, bei Industrieaufträgen, Tagungen, Gremiensitzungen und der anderen täglichen Arbeiten die ganzen Jahre über so bewährt haben, daß ich auf meine Mannschaft richtig stolz bin.

So richtig kann ich mich noch garnicht an die Ingenieurarbeit gewöhnen. Das merkt man auch an meinen beiden Beiträgen in diesem Heft, die noch

ein Ausfluß meiner Rektortätigkeit sind und nicht unbedingt wissenschaftlichen Tiefgang atmen.

Das letzte Jahr meiner Amtszeit als Rektor war natürlich geprägt von der 225-Jahrfeier und der EXPO-Zeit, zu der wir auf allen wissenschaftlichen Gebieten der TU eine so große Anzahl von Tagungen, Symposien und Workshops veranstalteten, daß ich mir eine neue Zeiteinheit „Grußwort“ geschaffen habe, sonst wäre ich da nicht über die Runden gekommen. Höhepunkt war natürlich die Jubiläumsfeier im Juli bei strahlendem Wetter, Festreden und über 1000 Liter Freibier. Unser Ministerpräsident Sigmar Gabriel bezeichnete uns als „Perle Niedersachsens“, der Vorsitzende des Vereins der Freunde, Prof. Eckehard Schulz (Thyssen) lobte unsere praxisnahe Ausbildung und alle swingten mit beim Jazzfrühschoppen im Innenhof mit einer in Clausthal nicht mehr ganz unbekannten Band. Das Nachspiel: Zur Zeit wird eine CD mit Auszügen aus den Festreden (aber nur die markantesten Sätze, bei denen wir ganz fürchterlich gelobt werden) und der Jazzmusik unserer Hauskapelle erstellt, die wir als Weihnachtsgeschenk verteilen. Das Ganze ist ein Geschenk von Mitgliedsfirmen des Stahlverbandes, die diese CD standesgemäß in eine „unkaputtbare“ Stahlschachtel verpacken – ihnen gilt unser besonderer Dank. Also, wenn Sie eine wollen, Nachricht genügt für die Übersendung einer optisch wie akustisch ansprechenden Erinnerung an Clausthal.

Gottseidank sind die Studentenzahlen der TU Clausthal wieder so ermutigend, daß wir uns um den mittelfristigen Fortbestand unserer Universität keine Sorgen zu machen brauchen. Leider trifft dies aber für die „klassischen“ Ingenieurfächer Maschinenbau und Verfahrenstechnik nicht zu, während Studiengänge, die – vor oder hinter dem Bindestrich – die Reizworte „Informatik“ oder „Wirtschaft“ enthalten, wie verrückt boomen. Mit mageren Anfängerzahlen im Maschinenbau stehen wir aber nicht alleine da, mit wenigen Ausnahmen ist das immer noch ein deutschlandweites Problem und wird in den nächsten Jahren zu einem dramatischen „Loch“ im Ingenieurwachstum führen. Ich kann zur Zeit nur jedem jungen Menschen empfehlen Maschinenbau zu studieren, denn abgesehen von dem Spaß, den man dabei hat, wird man später in der Industrie in Gold aufgewogen werden – schon jetzt bietet man mir Kopfgelder für die Nennung von Studenten, die demnächst fertig werden.



Nicht zuletzt unter diesem Eindruck bemühen wir unter der Leitung von Martina Wächter uns um das Intensivstudienprogramm Maschinenbau, mit dem wir die Studierwilligen in acht Semestern durch das Studium „jagen“ wollen. Seitens der jungen Leute stößt das Projekt auf außerordentliches Interesse, und die Industrie hilft mit Stipendien auf Leistungsbasis bei der Finanzierung des Studiums mit. Bisher konnten wir ca. 40 Stipendien aus der Industrie einwerben. Dieses Studienprogramm ist auch gleichzeitig der erste Modellfall für ein voll durchmodularisiertes Studium, von dem wir uns für die Studierenden eine wesentlich größere Flexibilität und Effizienz versprechen, beispielsweise für die Einführung von Bachelor- und Masterstudiengängen oder für ein auslandsbezogenes Studium. Das Thema wird uns sicherlich noch über eine Reihe von Institutsmitteilungen begleiten – auch in der vorliegenden Ausgabe befaßt sich ein Artikel damit.

In der Forschung des Instituts kann man von einem Wendepunkt sprechen. Der Sonderforschungsbereich „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“ ist zum 31. 2. 99 ausgelaufen und mit ihm eine ganze Reihe interessanter und industriell wichtiger Themenstellungen. Zur Zeit bemühen wir uns um einen von der DFG geförderten Transferforschungsbereich, um die Grundlagenerkenntnisse des SFB in Zusammenarbeit mit der Industrie umzusetzen. Den Abschluß des SFB bildete eine Eurokonferenz im Juli und ein Buch, das – hoffentlich jetzt endlich – im Springer-Verlag erscheint (Sie sehen schon an der Formulierung, daß sowohl die Konferenz als auch das Buch einige Nerven gekostet haben – Hagen Birkholz und Andreas Große sehen wesentlich blasser aus als im Vorjahr).

Aber dafür gibt es neben einer Renaissance auf dem Gebiet der Welle-Nabe-Verbindungen (Martin Garzke mit innenhochdruckumgeformten, Hagen Birkholz mit längsstiftverbundenen und Günter Schäfer mit der nächsten Auflage von Zahnwellenverbindungen) völlig neue Forschungsthemen: Im Sommer gelang uns die Einwerbung eines Seiltrommelprüfstandes der Edelklasse, auf dem nach der erfolgreichen Diss. von Jürgen Henschel nunmehr Ilaka Mupende und Steffen Otto völlig neue und leichtere Seiltrommeln, Seiltriebelemente und Seile entwickeln. Der Kauf einer Rapid-Prototyping Maschine erweitert nicht nur unser CIM-Labor erheblich, sondern verhilft Eric Klemp und Detlef Trenke zu europäischen Forschungsaktivitäten – nicht zu vergessen die Schlüsselanhänger, Schachspiele und Kuliständer, die so nebenher abfallen.

Auf zwei neue Forschungsaktivitäten will ich besonders eingehen. Mit Hilfe der unterschiedlichsten Forschungsgesellschaften haben wir uns mittler-

weile zu einem Institut mit anerkannter Kompetenz in Maschinenakustik entwickelt so daß bei uns die Prüfstände zu Lagergeräuschen, Körperschallfortpflanzung usw. wachsen. Berthold Käferstein entwickelt zur Zeit ein Projekt mit der Industrie und dem niedersächsischen Wirtschaftsministerium, bei dem es um die Schallfortpflanzung vom Reifen bis zum Ohr des Fahrers geht und aus dem eine eigene Forschungsstätte des Instituts werden soll. Das andere Projekt ist die Entwicklung eines größeren Forschungsprogramms mit dem Arbeitstitel „neue Produkte mit neuen Werkstoffen“, das wir gemeinsam mit anderen Universitäten aufziehen wollen – Torsten Grünendick schlägt sich da mit den Modalitäten des BMBF rum.

Das gesellschaftliche Leben wurde in diesem Jahr außer von zahlreichen Doktorfeiern (Jürgen Henschel, Reinhard Schmitt, Andreas Große, Klaus Heimannsfeld) von unserer Klausur in den Dolomiten beherrscht, bei der der Südtiroler Rotwein uns nicht nur zu spektakulären Darbietungen auf der Piste verhalf, sondern auch unsere Kreativität zu völlig neuen Lehr- und Forschungsformen bis in die tiefen Nachtstunden anfachte. Wir werden das wiederholen, nach Meinung der Mehrheit war der Rotwein ok, aber das Schifahren zu anstrengend.

Und da war ja noch das Ereignis, an dem im letzten Jahr das Institut fast zerbrach! Ich meine nicht unser glückloses Abschneiden bei der Bierstaffel, da sind wir schon wieder im Training! Nachdem unsre Admins Klaus Heimannsfeld, Carsten Düsing und Dieter Müller die Ächtung des Macintosh zielstrebig und jahrelang betrieben haben, haben wir im Juli komplett auf PC umgestellt. Eigentlich hat sich das ganz gut angelassen, obwohl mittlerweile jeder jeden Witz über Bill Gates kennt und die Damen des Sekretariats beim morgendlichen Hochfahren des Systems Worte gebrauchen, von denen ich früher nicht mal wußte, daß sie sie kennen. Auch die Tränenspurten derer, die an ihren Macs kleben wie Romeo an seiner Julia, sind mittlerweile getrocknet und weggewischt – ich habe aber den Verdacht, daß da heimlich in Schränken und Schreibtischen noch welche stehen und geheimbündlerisch betrieben werden (auch im Chefzimmer, ich gebe ja zu).

Wie immer wünsche ich Ihnen mit dieser manchmal nicht ganz ernst zu nehmenden Ausgabe viel Schmökervergnügen, ein ruhiges und gesegnetes Weihnachtsfest und ein erfolgreiches neues Jahr. Und lassen Sie sich wieder mal im schönen Oberharz blicken, wir freuen uns darauf!

Clausthal, im November 2000

## 225 Jahre Lehre und Forschung in Clausthal – die Geschichte unserer kleinen Universität

Dietz, P.

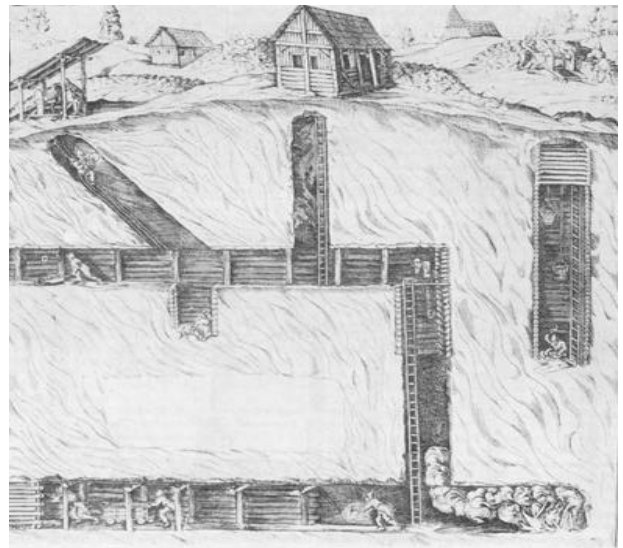
*(Auszug aus der Rede anlässlich der 225-Jahr-Feier der Technischen Universität Clausthal am Freitag, 16. Juni 2000 in der Aula der TU Clausthal. Anwesend waren der Ministerpräsident Niedersachsens, die Vertreter der niedersächsischen Hochschulen in der Landeshochschulkonferenz, die Rektoren und Präsidenten zahlreicher Hochschulen aus dem In- und Ausland und zahlreiche Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft)*

Meine Damen und Herren,

natürlich bin ich besonders stolz, daß ich Ihnen etwas von unserer Universität erzählen darf, von der es so einige Sprüche gibt, die Ihnen vielleicht bekannt sind:

- einzige Universität mit zwei Wintersemestern (stimmt überhaupt nicht, wie Sie bei diesem strahlenden Wetter feststellen können)
- einzige Universität Deutschlands ohne Bahnhof
- kleinste Universität Deutschlands, aber mit dem dem höchsten Niveau. Das ist der einzige Spruch, der meine volle Zustimmung findet, die 650 Meter über Meereshöhe erreicht sonst keine andere Universität Deutschlands.

Zweifelloos ist Clausthal eine ungewöhnliche Universität mit einem besonderen fachlichen Zuschnitt, der die Geschichte von der Gründung bis in die Gegenwart bestimmt. Zweifelloos ist ihre Gründung wie ihre gesamte Geschichte durch den Oberharzer Bergbau bestimmt, dessen wichtigste Elemente Sie auf der Darstellung **Bild 1** aus dem 17. Jahrhundert erkennen können - nur das hatte nichts mit Universitäten zu tun, denn damals gab es im Berg- und Hüttenwesen keine wissenschaftliche Ausbildung. Wie in allen anderen technischen Berufen erfolgte die Ausbildung durch Anlernen, während die Universitäten (Zitat) "sich den Werken des Schöpfers hinzugeben haben mit dem Streben sie erkennen und verstehen zu lernen". Das heißt, daß damals auch die höheren Bergbeamten in den Universitäten eine akademische Ausbildung in Philosophie und Jurisprudenz erhielten, vom eigentlichen Geschäft des Bergbaus aber keine Ahnung hatten, während die Betriebsleiter vor Ort oft nicht lesen und schreiben konnten.



**Bild 1:** Förderung und Fahrung untertage im Oberharzer Bergbau im 17. Jahrhundert

Einer der ersten, die dies anprangerten und damit den Grundstein für die Universitäten neueren Zuschnittes schuf, war Gottfried Wilhelm Leibnitz (**Bild 2**).



**Bild 2:** Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 – 1716). Jurist – Naturwissenschaftler - Ingenieur – Politiker – Philosoph. Er prangerte die damalige fachfremde Ausbildung der Bergleute an.

Er nannte sie: "mönchische Anstalten, die mit leeren Grillen sich beschäftigen, statt im Unterricht an Erfahrung und praktisches Leben anzuknüpfen". Leibnitz hat sicherlich durch die Gründung seiner Societäten aus vorwiegend Naturwissenschaftlern und ihrem Einfluß auf die Universitäten entscheidend zur Bildung eines neuen Universitätsverständnisses geschaffen, für Clausthal hat sein Wirken aber eine besondere Bedeutung. Bei seinem mehrjährigen Aufenthalte im Oberharz setzte er sich nicht nur für eine verbesserte Ausbildung des Grubenpersonals ein, er betätigte sich selbst auch als Gruben- und Hütteningenieur - übrigens mit miserablen Erfolg, wie die Chroniken berichten.

So in der Mitte des 18. Jahrhundert kam mit der Entwicklung von Bergbaumaschinen und verstärkter Förderung auch die Erkenntnis auf, daß Mathematik und Mechanik ein unverzichtbares Fach in der Ausbildung junger Leute sei - ein Gedanke, der durch Caspar Calvör (**Bild 3**), der als Superintendent die Schulaufsicht über den gesamten Bezirk hatte, getragen wurde. Er ließ Mathematik von den Markscheidern und Mechanik von den Maschinenleuten der Gruben bereits um 1720 in der Schule lesen - eine damals revolutionäre Tat. Die Kosten für diese Ausbildung wurden "hochherrschaftlich", also von Hannover übernommen.



**Bild 3:** Superintendent Caspar Calvör (1650-1725), der erstmals in der Lateinschule Mathematik und Markscheidewesen durch Clausthaler Bergleute lesen ließ

Die Diskussionen um die Ausbildung des Nachwuchses im Bergbau, an denen sich in hervorragender Weise die geistlichen Schulaufseher ebenso beteiligten wie die bergmännischen Führungskräfte, führten zur Einrichtung eines einjährigen Kurses für Berg- und Hüttenleute am 9. Mai 1775, auf dieses Datum wird die Gründung unserer Bergakademie und späteren Technischen Universität

festgelegt. Die Errichtungsurkunde ist in **Bild 4** dargestellt.



**Bild 4:** Errichtungsurkunde des einjährigen Lehrkurses für Berg- und Hüttenleute durch Claus Friedrich von Reden. Die Urkunde kennzeichnet das Gründungsdatum der montanistischen Lehranstalt und späteren Bergakademie 1775.

Herausgeber war der damalige Berghauptmann Claus Friedrich von Reden (**Bild 5**), der als Begründer unserer Universität gilt, der Superintendent Johann Christoph Friderici hatte die kirchliche Aufsicht. Leiter der Lateinschule - oder wie es damals hieß - des Lyzeums - war der Theologe Rettberg, der damit auch als der erste Rektor unserer Universität angesehen werden konnte.

Friderici und Rettberg entwickelten in den folgenden Jahren einen Lehrplan, der eine für die damalige Zeit beachtliche Vielfalt in Geologie, Mechanik, Mineralogie und Chemie auswies. Sehr starken Einfluß nahmen damals die Berghauptleute von Trebra und von Reden und der Stadtapotheker von Clausthal, Johann Christoph Ilsemann, insbesondere trug der Goethefreund Trebra entscheidend zum damals schon beachtlichen Niveau der Kurse bei.

Die Zukunft der Ausbildung in Clausthal war im übrigen - ganz anders als die vom sächsischen Staat geförderte Schwesternhochschule in Freiberg - ständig durch politische Umtriebe gefährdet, dies mag mit dem wechselvollen Schicksal des Harzes zusammenhängen, der in napoleonischer Zeit dem Königreich Westfalen zugeschlagen wurde, dann wieder an Hannover fiel und letztendlich in Preußen

landete. Zeitweise war auch durch den damaligen Finanzminister von Bülow eine Verlagerung nach Halle geplant einschließlich der damals schon beachtlichen Mineraliensammlung, bis dann doch die Erkenntnis sich durchsetzte, daß man eine Bergmannsausbildung am besten in der Nähe von Bergwerken durchführte.



**Bild 5:** Claus Friedrich von Reden, Berghauptmann in Clausthal 1769 – 1791, der Begründer der montanistischen Lehranstalt.

1811 wurde ein Haus für die Bergschule angekauft, das von der späteren Akademie übernommen wurde (**Bild 6**).

Die Erinnerung hieran wird durch ein Studentenlied wachgehalten:

Zu Clausthal auf dem Marktplatz,  
da steht ein kleines Haus,  
mit Schiefeln schwarz behangen  
sieht es gar mürrisch aus.  
Das ist die alma mater,  
des Oberharzes Ruhm,  
drin drängelt und drückt sich und bückt sich das  
Bergstudententum.

Der Unterricht wurde damals mit 56 Bergschülern begonnen. Zu Anfang fand der Unterricht allerdings noch in den Privathäusern der Lehrer statt, da das Gebäude die Mineraliensammlung, eine Modellsammlung und eine Bibliothek besaß, die sie weitgehend ausfüllten. Die Eingliederung einer Forstschule 1821 machte aber sehr rasch weitere Anbauten für chemische Labors und Unterrichtsräume notwendig. Der damalige Leiter war der spätere Oberbergrat Albert, der - wie wir alle wissen - hier im Oberharz das Drahtseil erfunden hat.

**Bild 7** zeigt den Marktplatz um 1850 mit der Marktkirche, dem Oberbergamt und der Bergschule, die sich damals zu einer hervorragenden Ausbildungsstätte für Berg- und Hüttenleute entwickelte. Die Verleihung der Bezeichnung Bergakademie 1864 war nur eine verspätete äußere Anerkennung des international anerkannten Niveaus. Damals waren 50% der Studierenden Ausländer, die Ausbildung war vorwiegend auf eine Tätigkeit als Bergingenieur ausgerichtet, weniger auf die Übernahme in den Staatsdienst.



**Bild 6:** Die heutige Römerstraße und Bergakademie um 1880





**Bild 7:** Marktplatz mit Marktkirche, Oberbergamt und Bergschule um 1850

Maßgeblich an dem Ruf der Bergakademie beteiligt war Adolf Roemer (**Bild 8**), der nach dem Studium der Rechtswissenschaften in Göttingen zunächst Bergassessor wurde und dann in der Bergschule Mineralogie und Geognosie lehrte. Als Leiter der Bergschule hat er wesentlich die Forschung des Bergbaus gefördert und damit den Grundstein für die Einheit von Lehre und Forschung an der Bergakademie gelegt.



**Bild 8:** Der Paläontologe Friedrich Adolf Römer, ab 1846 in der Bergschule tätig, ab 1853 Leiter der Bergschule. Unter ihm wurde das Ingenieurexamen eingeführt und die Bergschule zur Bergakademie erhoben.

Dann kamen aber wieder schlechte Zeiten: 1866 fiel Hannover - und damit Clausthal - an Preußen, das bereits eine Bergbauakademie in Berlin betrieb und den Zuschnitt der Clausthaler Ausbildung nicht anerkennen wollte. Man meinte, daß eine Bergakademie in Preußen ausreiche und wollte die Ausbildung in Clausthal auf das Niveau einer Steigerschule reduzieren. Dieser Gedanke hatte zwei grundsätzliche Fehler: Erstens war die in Clausthal gebotene Ausbildung besonders im Ausland wesentlich beliebter, weil sie praxisnäher war. Und zweitens war die beabsichtigte Einsparung nicht erzielbar, weil die Bergakademie damals aus der Bergbaukasse finanziert wurde, die aus Sondersteuern aus Bier und Branntwein gespeist wurde. Die Bergakademie blieb als "Vereinte Bergakademie und Bergschule" erhalten. Diese Finanzierung auf der Basis von Bier und Schnaps schien der Bergakademie gut zu bekommen, die Zahl der Studierenden stieg von 48 auf 277 um die Jahrhundertwende, darunter 40 Ausländer.

Es gab damals noch eine interessante Struktureigenheit der "Vereinigten Bergakademie und Bergschule". Während die damals neu entstandenen Technischen Hochschulen direkt dem Minister unterstanden, bestand in Clausthal ein Kuratorium als Aufsichtsbehörde. Dieses durch die Bergbauindustrie gebildete und für die Finanzierung äußerst wichtige Gremium, das wir vielleicht heute mit "Hochschulrat" übersetzen würden, war aber durch seine einseitigen Interessen der akademischen Entwicklung der Bergakademie eher hinderlich als

förderlich. Folgerichtig wurde dann im Jahre 1908 in eine dem Ministerium unterstellte Bergakademie und eine von dem "Clausthaler Bergschulverein" finanzierte Bergschule aufgeteilt - eine Konstruktion, die sich bis heute bewährt hat. Die Bergakademie war den Technischen Hochschulen gleichgestellt, erhielt das Recht zur Verleihung des Diplomgrades und gemeinsam mit den anderen Bergakademien 1920 das Promotionsrecht. Gleichzeitig wurden die Eingangs- und Prüfungsbedingungen wesentlich verschärft, was die Studentenzahl prompt wieder auf 125 sinken ließ.

Bereits in der Wachstumszeit der Bergakademie hatte man erkannt, daß das schieferbehängene Haus bei weitem nicht mehr für die Erfüllung der Lehr- und Forschungsaufgaben ausreichte. Nach mehreren An- und Neubauten beschloß man das Hauptgebäude neu zu bauen, wobei besonders darauf Wert gelegt wurde, daß die reichen Sammlungen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden.

Die folgenden Bilder zeigen den stufenweisen Aufbau des damaligen Neubaus. Da der Unterricht nicht ausfallen durfte, wurde zunächst unter Erhalt des alten Gebäudes bis 1905 der rechte Teil des Hauptgebäudes errichtet (**Bild 9**), dann wurde die alte Bergakademie abgebrochen und bis 1906 der Rest errichtet (**Bild 10**). Die offizielle Einweihung war 1907.

Wer das Gebäude heute kennt, wird nur sehr schwer eine Beziehung zu den hier gezeigten Bildern erkennen. Die ursprüngliche Absicht des Architekten mit dieser gegliederten Form war es, die Wuchtigkeit des weithin sichtbaren Gebäudekomplexes zu mildern durch Gauben und Erker, durch Türmchen und einen kunstvoll gestalteten Eingang, über dem sich der Rektor auf einem Balkon der staunenden Studentenschaft präsentieren sollte oder die Bergparade abnahm.

Dank der Kreativität der verschiedensten Bauräte des Staatshochbauamtes ist heute jede Ähnlichkeit mit dem alten Gebäude nur noch zufällig. Mit Argumenten, die von "wetterfest" bis "wartungsfreundlich" reichten, wurde das Gebäude mit Brettern vernagelt, alle Verzierungen abgebaut und auch innen so funktional umgebaut, daß kein Mensch mehr eine Verbindung zu dem alten architektonischen Gedanken herstellen kann (**Bild 11**). Erst in letzter Zeit gelang es uns durch einen Umbau im zweiten Stock den geplanten Zustand für die Sammlungen wiederherzustellen, so daß wir

unsere Geosammlung so einweihen konnten, wie sie mal vor fast hundert Jahren geplant war.

Nach dem ersten Weltkrieg gelang der Bergakademie ab 1919 ein neuer Aufschwung. **Bild 12** zeigt die Entwicklung der Studentenzahlen mit den damals angebotenen vier Studiengängen - die auf etwa 200 Studierenden ausgelegten Räumlichkeiten platzten aus allen Nähten. Es folgten Erweiterungsbauten wie beispielsweise die Aula, das Maschinenwesen und die Chemie auf den Spittelwiesen (**Bild 13**). Hervorzuheben ist dabei Fritz Süchting, der nicht nur das Geld für den Bau des Maschinenwesens erhandelte, erstritt und erbettelte, sondern sich einen besonderen Ruf durch die Einführung von Laboratorien mit praxisgerechten Übungen erwarb, wie sie bis dahin nicht bekannt waren. Seine anschaulichen Modelle - sie sehen eines davon auf dem Weg zum Hörsaal in **Bild 14** - sind heute noch zum Teil vorhanden und nur schwer durch die modernen Multi-Media-Methoden zu ersetzen.

1921 wurde der Verein von Freunden der Bergakademie Clausthal gegründet, der sich seit seinem Bestehen nicht nur als großer Förderer in finanzieller Hinsicht erwiesen, der darüber hinaus die Verbundenheit zu und unter den ehemaligen Studierenden über die gesamte Zeit seines Bestehens gepflegt hat. Ihm sei dafür herzlich gedankt.

Die Staatsumwälzung infolge der Machtübernahme durch das nationalsozialistische Regime brachte zwar organisatorische Umwälzungen mit sich, hatte aber auf die Interna der Bergakademie weniger Auswirkungen als die ihr vorangegangene wirtschaftliche Weltkrise. Die Studentenzahl sank - nicht zuletzt bedingt durch Schließung und Rationalisierung der Oberharzer Berg- und Hüttenwerke - von 913 in 1925 auf 203 im Jahre 1933, sie fiel bis zum Ausbruch des Kriegs auf 106 ab. Die Bergakademie bildete in dieser Zeit die noch heute existierenden beiden Fakultäten, die bestehenden Korporationen wurden aufgelöst und Kameradschaften zugeordnet und der staatliche Geldstrom wurde natürlich auch immer dünner.

Mit dem Ausbruch des Krieges wurde im September 1939 die Bergakademie geschlossen und das Personal zum Wehrdienst eingezogen. Während des Krieges wurden in den Räumen der Bergakademie Spezialkurse für den akademischen Nachwuchs eingerichtet und zur Beschleunigung des Studiums Trimester eingeführt. Dieser Betrieb wurde bis zum Einzug der Besatzungstruppen mit Un-



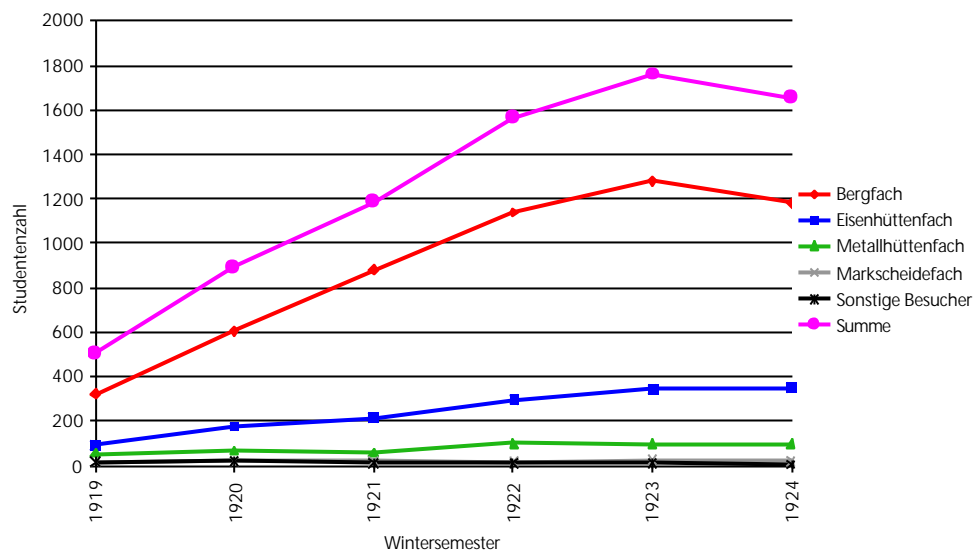
**Bild 9:** Der 1905 fertiggestellte Ostflügel der Bergakademie mit Giebeln, Türmchen, Balkon und Haupteingang



**Bild 10:** Neubau der Bergakademie mit neu gestalteter Marktplatzanlage (Foto um 1920)



**Bild 11:** Hauptgebäude der Bergakademie am Hindenburgplatz nach dem Umbau 1965



**Bild 12:** Entwicklung der Studierendenzahlen nach dem ersten Weltkrieg



**Bild 13:** Neubauten auf den Spittelwiesen um 1930: Aula, Chemie und Maschinenwesen



**Bild 14:** Vorlesungsmodell zur elektrotechnischen Vorlesung von Prof. Fritz Süchting



terbrechungen aufrechterhalten, danach wurde erst einmal alles entlassen oder verhaftet - bis auf die drei Professoren Hock, Wassermann und Krüger, die sich zur Aufgabe machten, in den verwaisten, eigentlich vom Krieg nur wenig beschädigten Instituten den Lehrbetrieb und die Bergakademie wieder neu aufzubauen.

Die Existenz war wieder einmal gefährdet. Die Militärregierung hatte kein Interesse an der Bergakademie, das Lehrpersonal war entlassen, gefallen oder emeritiert, durch die Geldentwertung traten erhebliche finanzielle Schwierigkeiten auf und schließlich waren die Institute nicht mehr in bestem Zustand. Ich weiß beispielsweise vom Institut für Maschinenwesen, daß der Hausmeister, der darin auch wohnte, mittlerweile einen Teil des Hörsaalgestühls und eine Reihe von Holzfußböden verheizt hatte und mehrere Räume zu Ziegen- und Hühnerställen umfunktioniert hatte. Aber es gab studierwillige junge Leute!

So öffnete die Bergakademie am 12. Juni 1946 wieder ihre Pforten für 200 Studenten - mehr ließ die Militärregierung von 400 Anmeldungen nicht zu. Die Zulassungsquote wurde allerdings in den Folgejahren erhöht, so daß im Jahr 1950 die Zahl der Studenten wieder 721 betrug.

Dem Geschick der damaligen Rektoren Krüger und Wassermann und vor allem dem unermüdlichen Eifer des damaligen Verwaltungschefs, des Bergoberinspektors Hellmut Otto, der in Clausthal nur unter dem Namen "Herr Akademiebesitzer" bekannt war, ist der erneute Aufbau der heutigen Universität mit einer ausreichenden Ausstattung an Personal und Labors zu verdanken. Es folgten weitere Neubauten wie z.B. das Bergbauinstitut, das Institut für Metallkunde oder das Steine und Erden Institut. Und die Studentenzahl stieg in diesen Jahren ebenso an wie die wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Tagungen und internationalen Beziehungen. Allein die Bergbaustudentenzahl betrug mehr als 1600, auch Hüttenleute waren es mehr als 1000 (**Bild 15**).

Sie sehen aber auch auf der Darstellung, wie sich die nächsten Probleme schon wieder anbahnen. Die Krise der Montanindustrie führte in den beginnenden sechziger Jahren wieder zu einem Abbau der Studentenzahlen. Um diesem entgegenzuwirken, wurde mit dem Ministerium und dem Wissenschaftsrat eine breitere Basis durch Aufnahme weiterer Studiengänge und Institute auf dem Gebiet der Naturwissenschaften und des Ingenieurwesens beschlossen, die Kernkompetenzen in Bergbau und

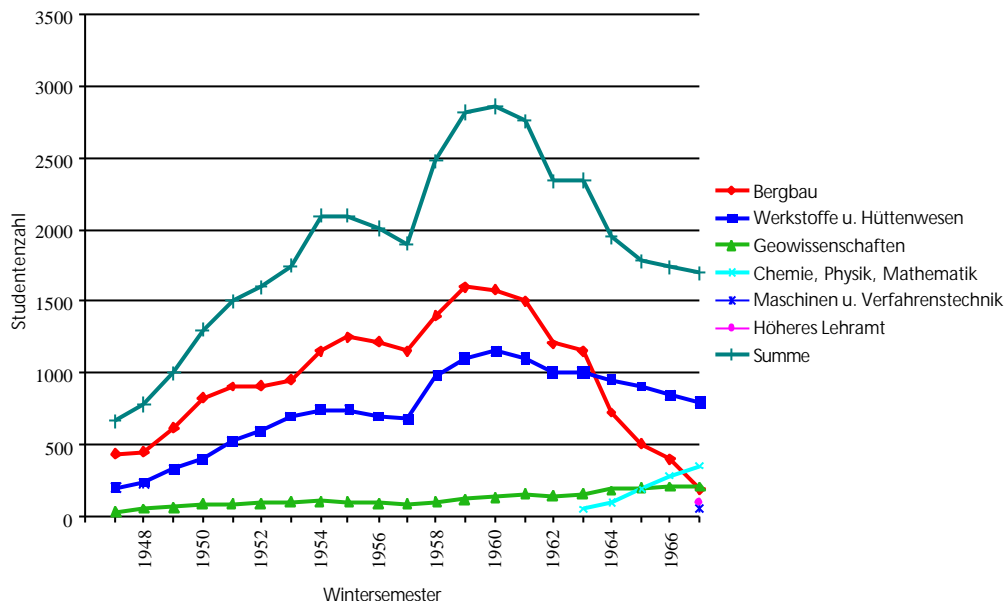
Geologie wurden um das Feld der Erdölwissenschaften ergänzt. Die Anzahl der Institute wurde etwa verdoppelt, die Anzahl der an der Bergakademie Beschäftigten wurde erheblich vergrößert. Zur Unterbringung der neuen Institute wurde das Gebiet am Feldgraben mit etwa 250000 m<sup>2</sup> erworben und Studentenheime erbaut (**Bild 16**). Besonderer Dank gilt dabei dem Verein von Freunden, der durch politischen Einfluß, durch Einsatz nicht unerheblicher Mittel und nicht zuletzt durch ein unerschütterliches Vertrauen in die alma mater diese Wandlung von der Bergakademie in eine Technische Hochschule begleitet hat.

Diese Wandlung, die 1966 mit der Umbenennung in die Technische Hochschule ihren Abschluß fand, prägt noch heute das Bild unserer Hochschule. Herausragende Figuren waren dabei neben dem "Akademiebesitzer" Otto die Rektoren Pilger, Wöhlbier und Riester, die es auch geschickt verstanden, den gerade anstehenden Generationenwechsel an Professoren zur Einwerbung anerkannter Wissenschaftler zu nutzen und damit den künftigen Erfolg entscheidend mitzubestimmen.

Luther, der von 1966 bis 1968 Rektor war und ganz offensichtlich ein erhebliches politisches Talent besaß, gelang die Einführung von Maschinenbau und Verfahrenstechnik und die Aufnahme von Lehramtsstudiengängen für naturwissenschaftliche Fächer. Verbunden damit war die Bezeichnung "Technische Universität Clausthal", die wir seit dem 1. April 1968 tragen und die auch in das Stadtbild eingeflossen ist (**Bild 17**).

Diese Wandlung zur Technischen Universität war die richtige Entscheidung und trug insbesondere in einem erheblichen Anstieg der Studentenzahlen Früchte (**Bild 18**). Man sieht deutlich, daß bei etwa gleichbleibenden Zahlen in Mathematik und Naturwissenschaften der Zuwachs der Hochschule von den neu eingerichteten Ingenieurwissenschaften getragen wurde. Allerdings muß ich hinzufügen, daß die Kurve unserer traditionellen Kundschaft, der Berg- und Hüttenleute, sich nicht wieder erholt hatte und von den anderen Studiengängen kompensiert werden mußte.

In dieser Darstellung sehen Sie auch, wie eine Technische Universität, die praktisch nicht durch Geistes- und Sozialwissenschaften abgedeckt ist, den Schwankungen der Wirtschaft unterliegt. Trotz der auch in dieser Darstellung erkennbaren Ölkrise erhöhte sich die Studentenzahl bis 1991 ständig und erreichte den für Clausthal schon "ungesun-



**Bild 15:** Entwicklung der Studierendenzahlen nach dem zweiten Weltkrieg bis 1967



**Bild 16:** Der Campus der Technischen Universität Clausthal

den" Stand von nahezu 4200. Dann aber sorgte die Wirtschaftskrise in den darauf folgenden Jahren für einen erheblichen Einbruch bei den Neuzugängen. Diese Studiermüdigkeit in naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Fächern läßt sich an allen Hochschulen Deutschlands feststellen und scheint sich erst jetzt so langsam wieder zu erholen.

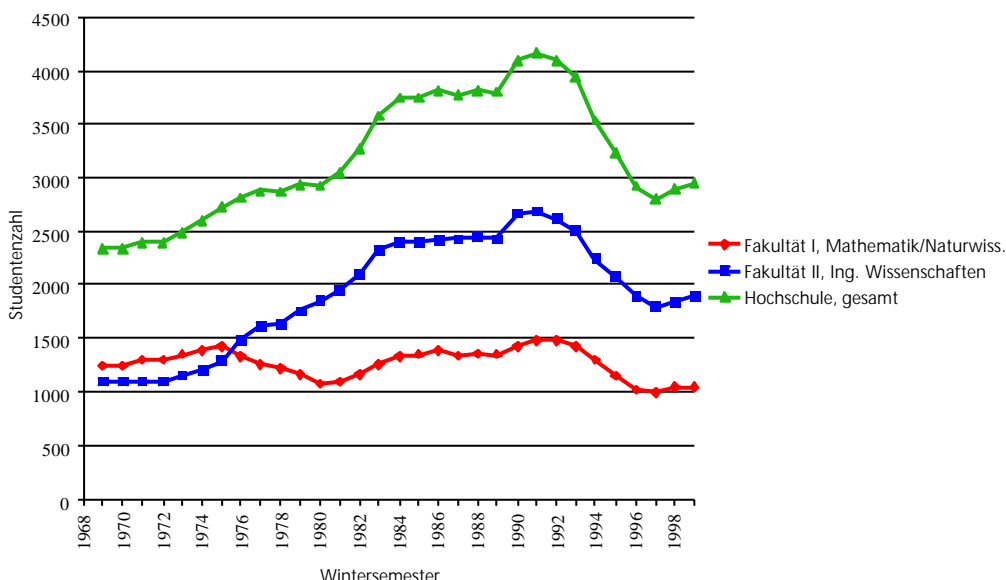
Wir kommen damit zum jetzigen Bild unserer Universität und der Frage, wie sie auf diesen Strukturwandel reagiert hat. Ohne sich von ihren Kernkompetenzen der rohstoff- und energiebezogenen Lehre und Forschung abzuwenden, wurden eine Reihe von neuen Studiengängen geschaffen, so daß sich die TU Clausthal heute präsentiert als eine moder-

ne Lehr- und Forschungsanstalt, deren Kompetenz in einer ganzen Reihe von öffentlichen Rankings immer wieder bestätigt wird.

In **Bild 19** sehen Sie unser heutiges Angebot an Studiengängen gegliedert nach Fachbereichen. Sie erkennen aber darauf auch gleichzeitig die neue Struktur der Hochschule mit vier Fachbereichen, die fast durchwegs zusammengesetzt sind aus naturwissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Instituten. Diese strukturelle Veränderung wirkt sich zur Zeit in einer interessanten Diskussion um neue Studienangebote mit Lehrmethode in einem interfakultativen Rahmen aus, der uns sicherlich noch interessante Lehrgebiete und Forschungsverbünde für die Zukunft bescheren wird.



**Bild 17:** Clausthal ist stolz auf seine Universität



**Bild 18:** Entwicklung der Studierendenzahlen 1968 bis 1999

Im Bereich der Naturwissenschaften wurden insbesondere die Inhalte der Studiengänge Physik und Chemie überarbeitet und in Zusammenarbeit mit der Industrie ein Studienmodell geschaffen, das von den Kunden, also den Schülern, wie von den Abnehmern, also der Industrie, in gleicher Weise anerkannt wird. Den wesentlichen Ausbau der Informatik und die Einführung der sogenannten "Bindestrinchinformatik" durch Anreicherung der Lehrinhalte mit technischen und wirtschaftswissenschaftlichen Inhalten sehe ich schon deswegen als Erfolg

an, weil andere Universitäten Niedersachsens uns in diesem Bestreben nacheifern.

Eine wesentliche Wandlung hat die Universität aber auch im Bereich der Ingenieurwissenschaften erfahren, zu denen die Wirtschaftswissenschaften zählen. Wir haben durch Umwandlungen das wirtschaftswissenschaftliche Potential verstärkt, weil wir der Meinung sind, daß in allen Bereichen des industriellen Lebens - wofür wir vorwiegend ausbilden - eine wirtschaftswissenschaftliche Kompetenz den Vorrang vor Spezialwissen hat. Neben dem neu eingeführten Wirtschaftsingenieur oder dem Wirtschaftsmathematiker gilt das auch für die klassischen Studiengänge oder für die ebenfalls neu eingeführten Studiengänge wie Energiesystemtechnik oder Umweltschutztechnik.

Damit bietet sich die Technische Universität Clausthal mit ihren Eckdaten in dem im folgenden gezeigten **Bild 20**. Wir sind nach wie vor eine kleine Universität in einer der schönsten Landschaften

Deutschlands und mit einem besonderen Flair, in dem sich Studierende und Lehrende wohlfühlen. Da die Anzahl der Studierenden, der Lehrenden und der Kneipen begrenzt ist, trifft man sich nicht nur in den Vorlesungen, sondern erlebt diese Universität und ihre Universitätsstadt gemeinsam - im Winter manchmal

zwangsweise. Wir sind eine forschungsstarke Universität, wie uns ebenfalls von offiziellen Stellen bestätigt wird, ca. 38% unseres Normalhaushaltes werben wir zusätzlich durch Drittmittel ein. Und wir haben in Forschung und Lehre weltweite Beziehungen: Mit über 17% Ausländeranteil sind wir eine der internationalsten Universitäten Deutschlands.

Wenn Sie mich fragen, was ich mir für die Zukunft wünsche? Daß dies - bei steigenden Studentenzahlen, versteht sich, so bleibt!

## Studieren in Clausthal

### Die Studiengänge

#### • Fachbereich Mathematik und Informatik

- Mathematik
- Technomathematik
- Wirtschaftsmathematik
- Informatik
- Wirtschaftsinformatik



## Studieren in Clausthal

### Die Studiengänge

#### • Fachbereich Geowissenschaften, Bergbau und Wirtschaftswissenschaften

- Geologie
- Geophysik
- Geotechnik, Bergbau, Erdöl-/Erdgastechnik
- Wirtschaftsingenieurwesen



## Studieren in Clausthal

### Die Studiengänge

#### • Fachbereich Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Chemie

- Maschinenbau
- Energiesystemtechnik
- Verfahrenstechnik
- Chemieingenieurwesen
- Chemie
- Umweltschutztechnik

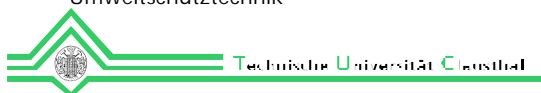


## Studieren in Clausthal

### Die Studiengänge

#### • Fachbereich Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Chemie

- Maschinenbau
- Energiesystemtechnik
- Verfahrenstechnik
- Chemieingenieurwesen
- Chemie
- Umweltschutztechnik



**Bild 19:** Die heutigen Studiengänge der Technischen Universität Clausthal, geordnet nach Fachbereichen

## Die Technische Universität Clausthal heute:

- <b>Studenten</b> insgesamt:	2486
davon weiblich:	441
Ausländer:	446
- <b>Personal</b>	
Mitarbeiter:	1715
davon Professoren:	94
davon wiss. Mitarb.:	394
- <b>Erträge</b>	
Landeszuschuß:	98.231.500,- DM
Drittmittel:	33.063.300,- DM
Gesamt:	131.294.800,- DM



**Bild 20:** Eckdaten der Technischen Universität Clausthal 2000

# Modell zur Beschreibung von Passverzahnungen bei schwingungsdynamischen Untersuchungen

Garzke, M.

*Vorgestellt wird ein Modell zur Beschreibung des Steifigkeitsverhaltens von Passverzahnungen unter Drehmomentbelastung bei schwingungsdynamischen Simulationen (NVH).*

*The paper describes a stiffness modell of splines under torque for computer simulations concerning noise, vibrations and harshness problems (NVH).*

## 1 Einleitung

Die Erfüllung des Zuverlässigkeitskriteriums "Dauerhaltbarkeit" hinsichtlich Verschleiß und Festigkeit ist neben Kosten, Zeit und Verfügbarkeit ein unumstößliches Qualitätsmerkmal von antriebstechnischen Lösungen. Das o.g. Kriterium wird dabei oftmals gedanklich vom Ingenieur mit relativ "großen" Amplituden gekoppelt. Jedoch können auch kleine Amplituden Probleme bereiten, insbesondere wenn diese im Eigenfrequenzbereich liegen und somit unerwünschte akustische und schwingungsdynamische Effekte im Antriebsstrang verursachen. Letztendlich kann dadurch auch die Dauerhaltbarkeit negativ beeinträchtigt werden.

## 2 Steifigkeitsmodell der Passverzahnung

Die zunehmende Etablierung von Simulationsmethoden ermöglicht bereits in einem frühen Stadium des Produktentwicklungsprozesses die Beurteilung u.a. des dynamischen Verhaltens von Bauteilen und Baugruppen. Voraussetzung für eine fundierte Ergebnisauswertung ist neben entsprechender Fachkenntnis und Urteilskraft des Anwenders die Verwendung von Simulationsmodellen, die das reale Bauteilverhalten genügend genau abbilden.

Passverzahnungen (Mitnehmerverzahnungen; früher auch unter den Begriffen Zahn- und Keilwellen-Verbindungen bekannt) bilden aus verschiedenen Gründen wichtige Systemkomponenten im Antriebsstrang energieumwandelnder Maschinen /1/:

- leichte Montierbarkeit
- hohe Leistungsdichte
- Selbstzentrierung

Die formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung nach **Bild 2** setzt sich zusammen aus:

- dem freien Wellenstück vor der Verbindung (Bereich ungestörter Torsion /2/; Steifigkeit  $c_{\text{Welle}}$ )
- dem Wellengrundkörper im Verbindungsbe-  
reich, in dem die Wellenzähne eingebettet sind  
(Steifigkeit  $c_{\text{WeKon}}$ )
- der Anzahl der tragenden Zahnpaare von Welle  
und Nabe (Steifigkeit  $c_{\text{Verzahnung}}$ )
- dem Nabengrundkörper zur Aufnahme der Na-  
benzähne (Steifigkeit  $c_{\text{Nabe}}$ )

Das Modell zur Unterteilung der gesamten Passverzahnung (Gesamtsteifigkeit  $c_{\text{ges}}$ ) in die entsprechenden Einzelsteifigkeiten zeigt **Bild 3**. Dabei bilden die Steifigkeiten  $c_{\text{Welle}}$ ,  $c_{\text{WeKon}}$ ,  $c_{\text{Verzahnung}}$  und  $c_{\text{Nabe}}$  eine Reihenschaltung von Federn. Eine Vereinfachung wird durch die Hintereinanderschaltung der Steifigkeiten  $c_{\text{WeKon}}$  und  $c_{\text{Verzahnung}}$  erreicht, Gl.1:

$$\frac{1}{c_{K+V}} = \frac{1}{c_{\text{WeKon}}} + \frac{1}{c_{\text{Verzahnung}}} \quad (\text{Gl.1})$$

Die einzelnen tragenden Zahnpaare ( $n$  Stück) bilden eine Parallelschaltung, Gl.2:

$$c_{\text{Verzahnung}} = \sum_{i=1}^n c_i \quad (\text{Gl.2})$$

Unter der Voraussetzung, dass der Nabenaußendurchmesser  $d_{e2}$  deutlich größer als der maßgebende Bezugsdurchmesser  $d_B$  der Welle ist ( $d_{e2} \geq 2 \cdot d_B$ ; z.B. /2/), kann die Nabe als unendlich steif angenommen werden ( $c_{\text{Nabe}} \rightarrow \infty$ ), wodurch sich die Gesamtsteifigkeit  $c_{\text{ges}}$  berechnen lässt, Gl.3:

$$\frac{1}{c_{\text{ges}}} = \frac{1}{c_{\text{Welle}}} + \frac{1}{c_{K+V}} + \frac{1}{c_{\text{Nabe}}} \quad (\text{Gl.3})$$

bzw.

$$\frac{1}{c_{ges}} = \frac{1}{c_{Welle}} + \frac{1}{c_{WeKon}} + \frac{1}{c_{Verzahnung}} \quad (Gl.4)$$

Damit kann die gesamte Passverzahnung als Bestandteil des Antriebsstrangs durch die Bewegungsgleichung eines Ein-Massen-Schwingers mit der Gesamtsteifigkeit  $c_{ges}$  beschrieben werden. Unter Anwendung entsprechender Simulationssoftware (FEM- und MKS-Programme) kann der Konstrukteur oder Berechner überprüfen, ob die Komponenten im Bereich der Eigenfrequenz des Systems betrieben werden oder nicht. Die Terme der Gl.3 bzw. Gl.4 bilden dabei die vom Konstrukteur direkt beeinflussbaren Größen, um eine gezielte Verschiebung der Resonanzfrequenz in höhere Drehzahlbereiche zu ermöglichen. Charakteristisches Merkmal einer Reihenschaltung von Federn ist die Tatsache, dass die Einzelsteifigkeiten stets größer als die Gesamtsteifigkeit sind. Diese Plausibilitätsbedingung ist bei der Berechnung stets zu überprüfen.

### 3 Rechengang

#### 3.1 Steifigkeit der Welle im Bereich ungestörter Torsion ( $c_{Welle}$ )

Die Steifigkeit des frei überstehenden Wellenstücks  $c_{Welle}$  vor dem Verbindungsbeginn (Gl.5) lässt sich entweder über Finite-Elemente-Analysen durch Auswertung des Verdrehwinkels oder über die Berechnung des Winkels (Gl.6) ermitteln. In diesem Fall ist jedoch die Kenntnis des Torsionsflächenmoment  $I_t$  des zylindrischen Ersatzquerschnitts der Welle mit dem Ersatzaußendurchmesser  $d_h$  Voraussetzung /2/:

$$c_{Welle} = \frac{T}{\hat{\alpha}} \quad (Gl.5)$$

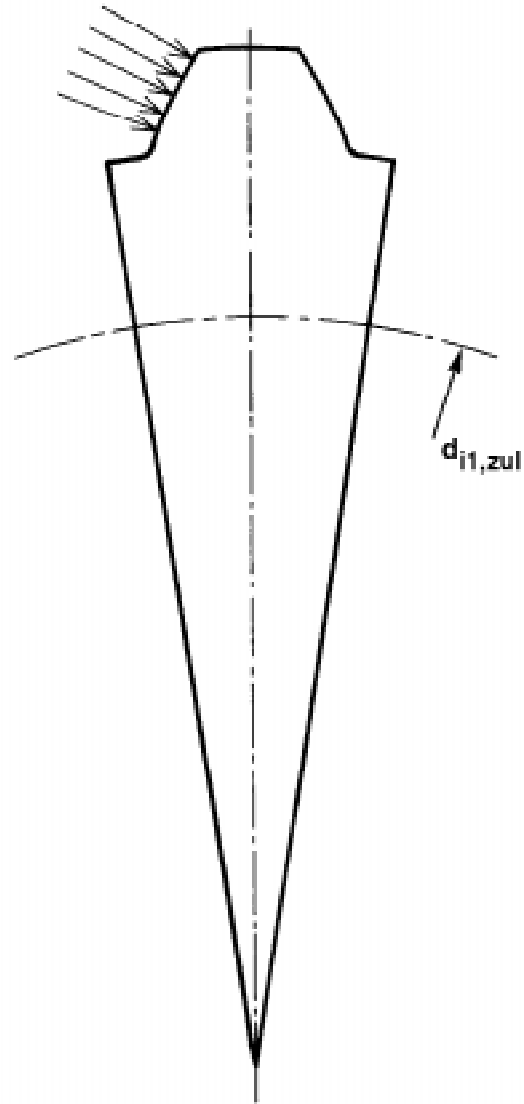
$$\hat{\alpha} = \frac{T \cdot l \cdot 32}{G \cdot \pi \cdot (d_h^4 - d_i^4)} \quad (Gl.6)$$

#### 3.2 Steifigkeit der Wellengrundkörper und der Verzahnung im Kontaktbereich ( $c_{K+V}$ )

Die Verdrehwinkeldifferenz  $\Delta\alpha_{K+V}$  zwischen einem Punkt am Außendurchmesser der Nabe und einem Punkt des Wellengrundkörpers, der auf einem Radius liegt, der kleiner ist als der Grenzinnenradius für die Gültigkeit der Dimensionierungsgleichungen für Passverzahnungen (**Bild 1**; /2, 3/), resultiert aus den elastischen Eigenschaften des Wellen-

grundkörpers am Verbindungsbeginn und der tragenden Zahnpaare. Die Teilsteifigkeit  $c_{K+V}$  wird durch Gl.7 berechnet:

$$c_{K+V} = \frac{T}{\Delta\hat{\alpha}_{K+V}} \quad (Gl.7)$$



**Bild 1:** Wellensektor einer Passverzahnung mit zulässigem Innendurchmesser

Die Ermittlung der Steifigkeit des Wellengrundkörpers  $c_{WeKon}$  aus FEM-Berechnungen gelingt durch Differenzbildung aus den Verdrehwinkelwerten am zulässigen Welleninnendurchmesser  $d_{i1,zul}$  am Verbindungsbeginn und -ende /2, 3/ unter analoger Anwendung der Gl.7.

Nach dieser Vorgehensweise könnte man auch die Steifigkeit der Verzahnung  $c_{Verzahnung}$  bestimmen. Wesentlich eleganter ist aber die Umstellung von Gl.1 nach der gesuchten Größe, da die beiden anderen Terme schon bekannt sind.



### 1.3 Steifigkeit der gesamten Passverzahnungsverbindung ( $c_{ges}$ )

Durch Einsetzen der berechneten Teilsteifigkeiten in Gl.1 oder durch Auswertung des Last-Verdrehwinkel-Zusammenhangs zwischen Drehmomenteinleitungs- und Drehmomentweiterleitungsort in einer FEM-Rechnung gelangt man zur Steifigkeit der Gesamtverbindung  $c_{ges}$ .

Mit diesen einfachen Überlegungen und Gleichungen ist es sehr einfach möglich, die für eine schwingungsdynamische Untersuchung mit einer Mehrkörpersimulationssoftware notwendigen Eingangsgrößen zu bestimmen.

## 4 Berechnungsbeispiel

Die Umsetzung der Modellbildung soll am Beispiel einer Zahnwellen-Verbindung mit Evolventenflanken nach DIN 5480 – 60x1x30x58 dargestellt werden.

Verzahnungsdaten:

Drehmoment:	$T=470 \text{ Nm}$
Durchmesser der zyl. Ersatzwelle:	$d_{h1}=58,2 \text{ mm}$
Welleninnendurchmesser:	$d_{i1}=0 \text{ mm}$
Elastizitätsmodul:	$E=210000 \text{ MPa}$
Querkontraktionszahl:	$\nu=0,3$
Freie Wellenlänge:	$l=90 \text{ mm}$
Gemeinsame Verbindungsbreite:	$b=36 \text{ mm}$
Nabenaußendurchmesser:	$d_{e2}=180 \text{ mm}$

Die zur Berechnung der Teilsteifigkeiten erforderlichen Verdrehwinkel(-differenzen) wurden aus einer FE-Berechnungen unter elastischem Materialverhalten ermittelt. Die Verzahnung wurde dabei geometrisch ideal abgebildet, d.h. es wurden keine Verzahnungsfehler in Form von Teilungs- und Zahndickenabweichungen an Welle und Nabe berücksichtigt. Dies impliziert ein identisches Trag- und Belastungsverhalten aller Zahnpaare über dem Verbindungsumfang.

Berechnungsergebnisse:

$c_{Welle}=1.011.000 \text{ Nm/rad}$   
 $c_{K+V}=6.866.400 \text{ Nm/rad}$   
 $c_{WeKon}=8.497.200 \text{ Nm/rad}$   
 $c_{Verzahnung}=35.075.000 \text{ Nm/rad}$  (gesamte Verzahnung mit 58 Zähnen)  
 (ein Zahnpaar:  $c_{1Zahnpaar}=605.000 \text{ Nm/rad}$ )  
 $c_{ges}=880.800 \text{ Nm/rad}$

Das in Kap.2 genannte Plausibilitätskriterium wird eingehalten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

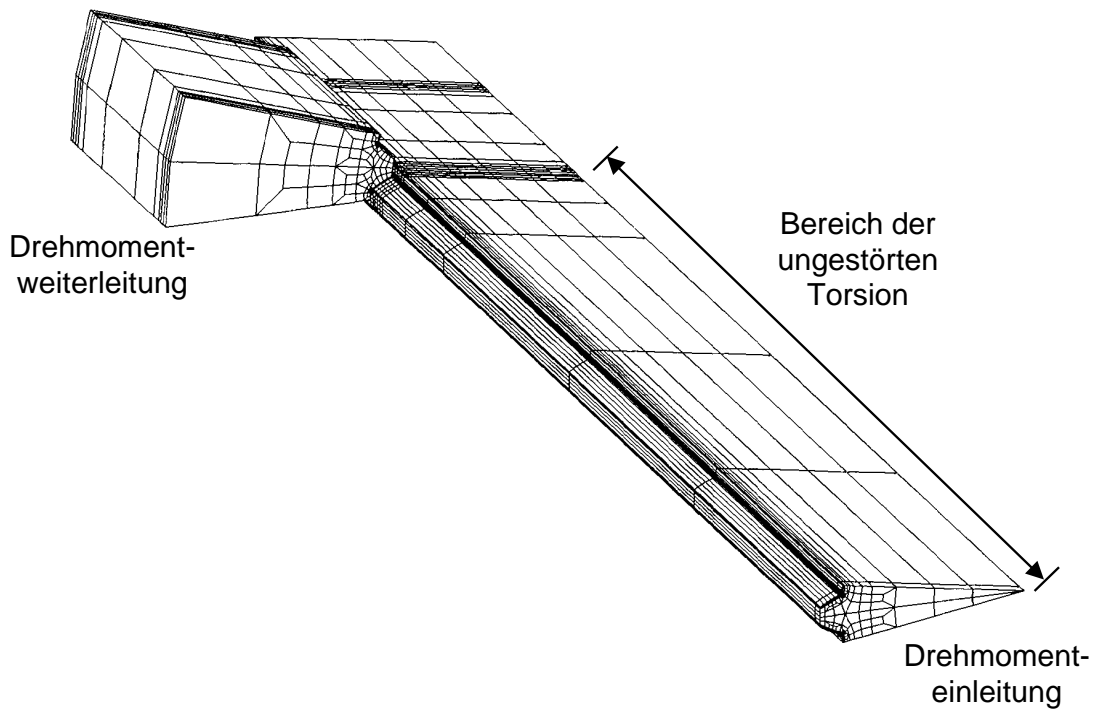
Mit der beschriebenen Modellbildung und der Analyse der Beeinflussbarkeit der entsprechenden Teilsteifigkeiten durch die Verzahnungsgeometrie konnte einem mittelständischem Getriebehersteller bei der Verbesserung einer Antriebslösung entscheidend weitergeholfen werden, da durch den empfohlenen Wechsel des Moduls der Passverzahnung der vormals eigenfrequente Betriebspunkt in einen unterkritischen Bereich verschoben wurde. Die Änderung der Verzahnungsdaten inkl. der Neufertigung der Passverzahnung verhinderte hier kostspielige sekundäre Lärminderungsmaßnahmen und evtl. eine Produkthaftung bei einem nicht auszuschließendem Schadensfall.

Die Erweiterung des Modells hinsichtlich der Berücksichtigung von Dämpfungsgliedern (z.B. Öl- oder Fettschmierung der Verzahnung) und/oder der Einbeziehung von Verzahnungsfehlern (Teilungs- und Zahndickenabweichungen an Welle und Nabe) ist problemlos möglich. Durch den zweitgenannten Gesichtspunkt wird das Tragverhalten der Zahnpaare über dem Verbindungsumfang lastabhängig, d.h. der Verdrehwinkel des Antriebsstranges wird durch das elastische Verhalten der drehmomentabhängigen Anzahl im Eingriff befindlicher Zahnpaare bestimmt. Damit wäre die Gesamtsteifigkeit und der Resonanzpunkt des Systems belastungsabhängig. Diese erhöhte Modellkomplexität würde eingehendere Analysen und ein vertieftes Anwenderverständnis der Verzahnungs kinematik und der Mechanik erfordern, um zweifelsfreie Aussagen zum Systemverhalten zu garantieren.

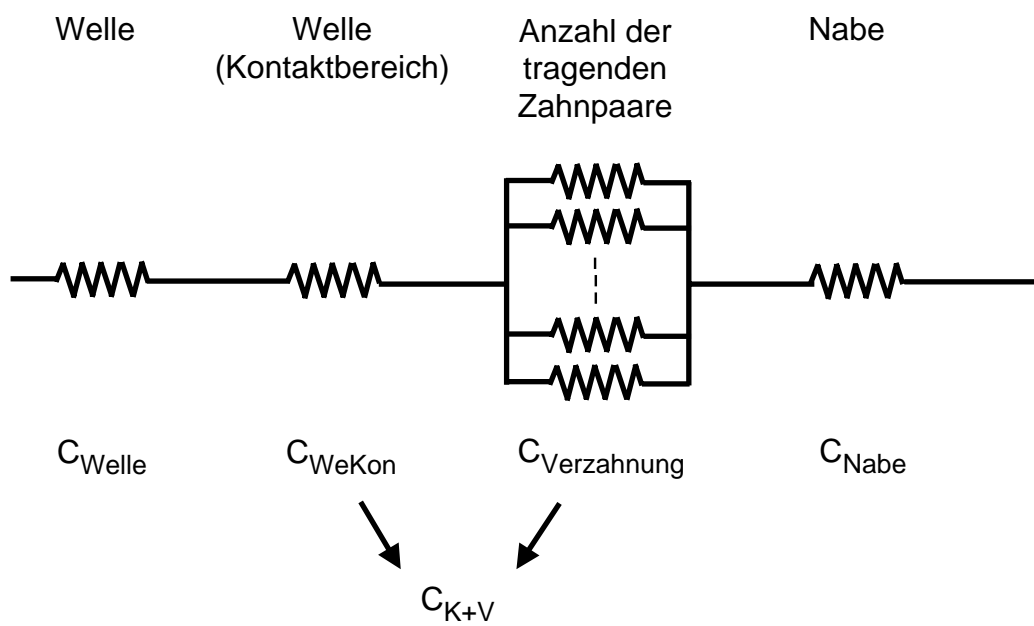
## 6 Literatur

- /1/ Garzke, M.; Schäfer, G.: Die Zahnwellenforschung im Wandel der Zeit. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1999
- /2/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation TU Clausthal 1996
- /3/ DIN 5466E Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen (Teil 1 und 2). DIN 1999





**Bild 2:** Sektormodell einer Passverzahnung mit Bezeichnungen



**Bild 3:** Unterteilung der Passverzahnung in Teilsteifigkeitssysteme

# Löten in der Luftfahrtindustrie

Grünendick, T.

*Das Löten ist in der Luftfahrtindustrie ein unverzichtbares Verfahren geworden. Die angewendeten Lötverfahren dienen zur Herstellung hochfester, oxidationsbeständiger Bauteile mit komplexer Geometrie und unterschiedlichen Werkstoffkombinationen sowie zur Rekonditionierung von verschlissenen Komponenten.*

*Brazing is getting an absolutely essential procedure in the aviation industry. The used methods are for the production of heavy strong and steady oxidation resistant materials with complex geometry and different material combinations as well as for recondition of worn components.*

## 1 Ursprung des Lötens

Die DIN 8505 beschreibt das Löten wie folgt:

*„Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht.“ /1/*

Sucht man mit dieser Definition nach den Anfängen des Lötens, so wird als erstes geschichtliches Datum der Löttechnik etwa das Jahr 5000 v. Chr. genannt. Hierbei handelte es sich zunächst um mittels dem Lötverfahren gefertigte Gold- und Silberschmuckstücke. Aber auch als Substitution des Nietens wurde das Löten eingesetzt, wie z.B. für die Grabbeigaben des Pharao Tut-ench-Amun.

Im Verlauf der Geschichte war die Löttechnik von vielen Zufällen begleitet, die durch unkonventionelle Denkprozesse vieler Handwerker eine kontinuierliche Entwicklung erfuhr. So erscheint es auch nicht verwunderlich, dass die Philosophen Hypokrates und Theophrast die Beschreibung des Lötverfahrens in ihren Werken aufnahmen.

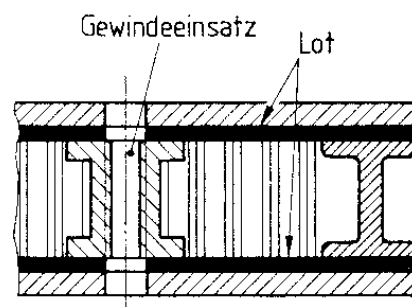
Als ein Beispiel der Kreativität auf dem Gebiet der Löttechnik sei das Patent des Engländers Durand genannt. Dieses Patent erhielt er 1810 auf eine gelötete kombinierte Fügeverbindung (Formschluss-Stoffschluss-Verbindung) zur Herstellung und zum Dichtlöten von Konservendosen. Eher

zufällig wurde dagegen 1906 bei General Motors das Schutzgas-Hartlöten entdeckt, /2/.

Mit dem Beginn intensiver Arbeiten auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt wurde die Forderung der Industrie nach hochfesten und oxidationsbeständigen Lötverbindungen immer stärker, insbesondere für Verbindungen mit unterschiedlichen Werkstoffen. Zu Anfang erfüllten die Gold-Basis-Lote (B-Au 4 [82 Au 18 Ni]) alle Wünsche der Luft- und Raumfahrtkonstrukteure, da sie die nötige Festigkeit, Zähigkeit und Heißgaskorrosionsbeständigkeit gewährleisten. Doch die hohen Kosten verdrängten die Gold-Basis-Lote überwiegend durch die Nickel-Basis-Lote, die bei ähnlichen Eigenschaften um ein vielfaches kostengünstiger sind. Aber auch andere Lote, meist auf Edelmetallbasis (Silber, Palladium), wurden entwickelt. Hergestellt werden diese Lötverbindungen, die überwiegend für die Triebwerkstechnologie eingesetzt werden, in einem Vakuumhartlotverfahren.

## 2 Das Hochtemperaturvakuumlöten

Das Löten im Vakuumofen hat sich für das Fügen hochbeanspruchter Konstruktionen aus Nickel, Titan, Zirkonium, Cobalt und hochwarmfesten Stählen im Flugzeugbau bestens bewährt. Durch die gleichmäßige Wärmeführung im Ofen werden Verformungen der Werkstücke und Wärmespannungen vermieden. Eine Regenerierung der Grundwerkstoffeigenschaften durch geeignete Wärmever- und -nachbehandlung lassen sich ebenfalls durchführen (Spannungsarmglühen oder Ausscheidungsglühen).



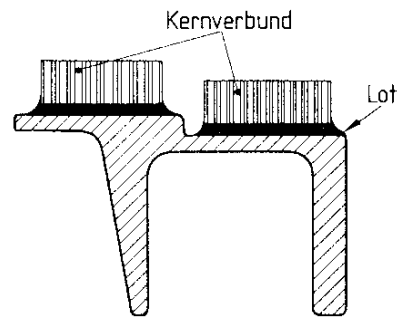
**Bild 1:** Kernverbund mit Gewindeeinsatz und Abschlußprofil, /3/

Das Vakuum (bis  $10^{-6}$  mbar) und der Einsatz von Inertgas verringert die Oxidation derart, dass ohne Flussmittel gearbeitet werden kann und somit enge Lötspalte vorgesehen werden können. Oft sind enge Spalte metallurgisch erforderlich, um Verbindungen hoher Festigkeit zu erhalten. Dies ist besonders wichtig bei der Herstellung hochbeanspruchter Teile, wie Turbinenschaufeln aus hochhitzebeständigen Werkstoffen, Verdichterlaufrädern sowie Honigwabenkonstruktionen, (**Bild 1** und **Bild 2**). Werden die engen Lötspalte beispielsweise beim Nickel-Basis-Lot nicht eingehalten, so bilden sich in der Lötnaht sehr harte intermetallische Phasen, die zum Versagen der Verbindung führen. Weniger problematisch ist dies beim Gold-Basis-Lot; hier nimmt die Festigkeit mit steigendem Lötspalt nur langsam ab. **Tab. 1** zeigt die Lötspaltbreite in Abhängigkeit von Lottyp, Lötverfahren und Arbeitstemperatur.

Lottyp	Lötspalt in mm	Herstellungsverfahren	Arbeitstemperatur
L-Ag	0,1 bis 0,15	mit Flussmittel	900°C - 1000°C
	0,01 bis 0,05	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	
L-Au	0,01 bis 0,05	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	950°C
L-Ni	0,01 bis 0,05	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	900°C - 1200°C
L-Co	0,01 bis 0,05	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	1150°C
L-Ti	0,01 bis 0,07	Vakuum, reduzierende Atmosphäre	940°C

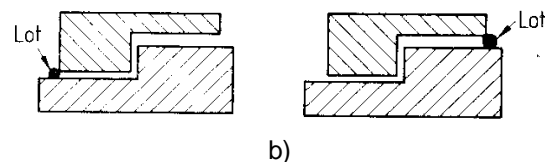
**Tab. 1:** Lötspaltbreite in Abhängigkeit von Lottyp und Lötverfahren

Die minimal geforderte Lötspaltbreite muss natürlich unter Berücksichtigung der Formabweichungen, der Dehnungen und der Vorrichtungen zur Fixierung der Lötteile auch bei Erwärmung auf die Löttemperatur gegeben sein. Dabei sollte der Lötspalt parallel oder verengend in Flussrichtung des Lotes verlaufen und eine Mittenrauigkeit von  $R_a = 12,5 \mu\text{m}$  nicht übersteigen. Bereiche, die nicht mit Lot benetzt werden dürfen, können durch oxidkeramische Lot-Stop-Pasten abgegrenzt werden. Diese Pasten werden aufgetragen und nach der Lötung wieder mit Reinigern abgewaschen. Die **Bilder 3 bis 5** zeigen einige Beispiele.

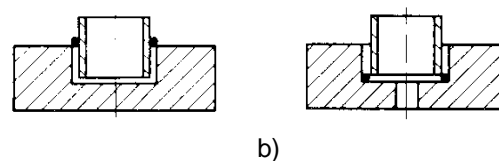


**Bild 2:** Hochtemperatur-Löten von Kernverbund-Turbinendichtungen, /3/

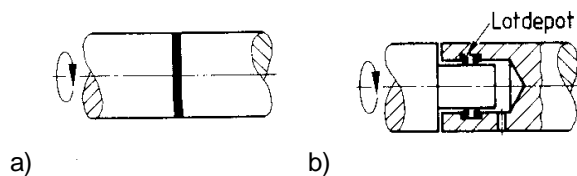
Außerdem werden im Vakuum beispielsweise bei Titan und Zirkonium, die mit der Atmosphäre reagieren, ein schädliches Verspröden der Werkstoffe vermieden. Titanlegierungen (TiAl6V4) sind aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften (bei ca. 60% des Stahlgewichtes weisen Titanlegierungen eine sehr hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit auf) ein in der Luftfahrtindustrie oft verwendeter Werkstoff, insbesondere für Anwendungen, bei denen geringe Massenkräfte gefordert werden. Zum Fügen von Titanlegierungen untereinander und in Kombination mit anderen Werkstoffen werden niedrigschmelzende Titan-Basis-Lote verwendet, die werkstoffähnliche mechanische Eigenschaften aufweisen.



**Bild 3:** a) unzureichende lötgerechte Gestaltung  
b) Lot in Richtung der Verengung fließen lassen, /3/



**Bild 4:** a) unzureichende lötgerechte Gestaltung  
b) zweckmäßige lötgerechte Gestaltung, da das Lot von innen nach außen fließt, /3/



**Bild 5:** a) unzureichende lötgerechte Gestaltung  
b) gute lötgerechte Gestaltung zur Übertragung größerer Torsionskräften, /3/

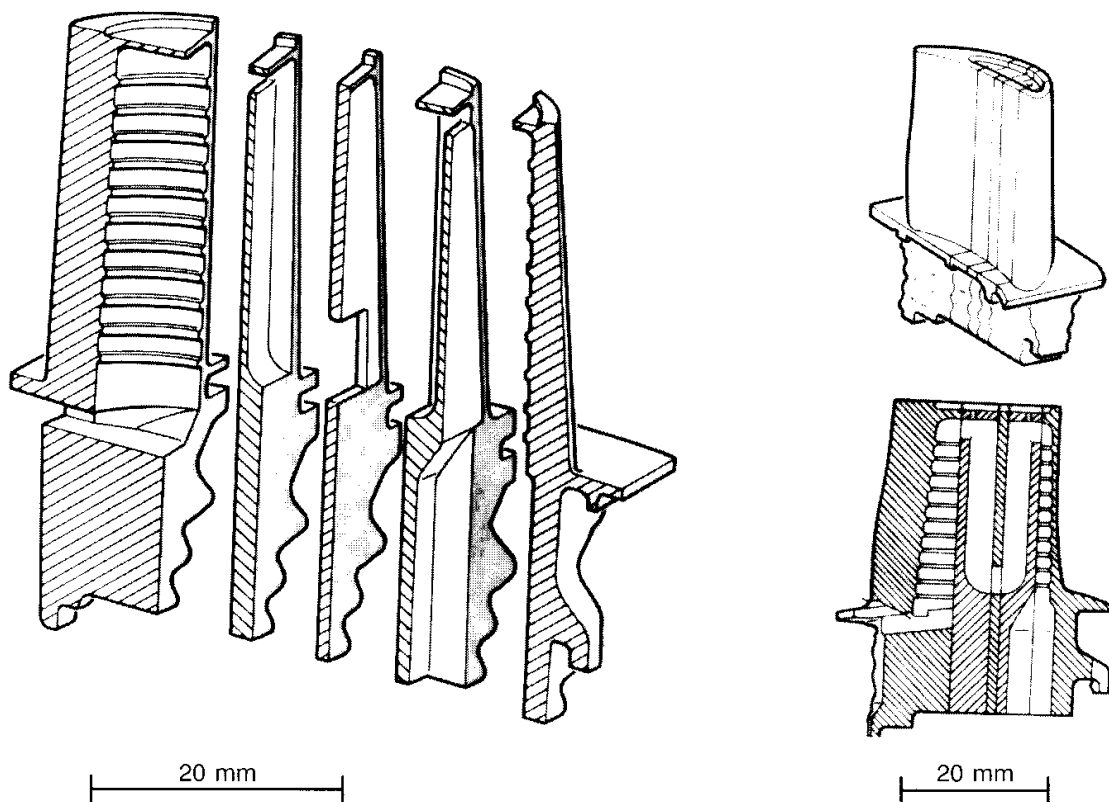
Das Lot kann als Formteil, Paste oder Pulver verwendet werden. Trotz der Selbstreinigungseffekte im Vakuumofen sollte die Lötstelle von Oxiden, Fett und Schmutz chemisch oder mechanisch gereinigt sein. Dieser Selbstreinigungseffekt entsteht durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Oxide und des Metalls, die ein Aufreißen der Oxidhaut bewirken und dem Lot das Benetzen des Metalls durch unterwandern der Oxidhaut ermöglichen. Die Affinität der Metalle bei hohen Temperaturen eine bestimmte Oxidmenge aufzunehmen und die Reduzierung der Oxide von im Vakuum befindlichem Restgas tragen außerdem zum

Selbstreinigungseffekt positiv bei.

Neben der Herstellung hochbeanspruchter Lötverbindungen, z. B. zum Einlöten von Verdichterschaufeln, eignet sich das Hochtemperaturlöten zur Rekonditionierung von beschädigten Schaufeln oder Labyrinthdichtstege. Die Schaufeln verschleifen im Blattbereich durch Erosion und thermischer Ermüdung. Zur Reparatur dieser beschädigten Flächen werden Lötfolien aufgetragen und bei hoher Temperatur festgelötet. Dabei erreichen diese Beschichtungen die Festigkeitswerte des Grundmaterials und in einigen Fällen sogar höhere.

### 3 Diffusionslöten

Beim konventionellen Löten wird das flüssige Lotgut durch Wärmeabfuhr unterkühlt und es erfolgt eine thermische Erstarrung (Bindung). Im Gegensatz zum konventionellen Löten wird beim Diffusionslöten die Löttemperatur solange gehalten, bis durch Diffusion zwischen Grundwerkstoff und flüssigem Lot das Lotgut bei Löttemperatur erstarrt. Ein großer Vorteil ist hierbei die erhöhte Wiederaufschmelz- oder Auslösetemperatur der Lötverbin-



**Bild 6:** Diffusionslötung mit hoher Festigkeit einer Laufschaufel aus einfachen Gussteilen (Prototypen), /4/

dung. Damit wird die Verbindung auch bei Temperaturen oberhalb der Löttemperatur mechanisch belastbar. **Bild 6** zeigt einen Prototypen einer Laufschaufel, die mittels Diffusionslötung aus einzelnen Gussteilen gefügt wird. Hier kommen überwiegend Nickel-Bor-Folien zum Einsatz.

#### 4 Perspektiven der Löttechnik

Die Löttechnik wird auch in Zukunft insbesondere für inkompatible Werkstoffe, die wegen ihrer schlechten Benetzbarkeit und teilweise stark unterschiedlichen Eigenschaften (z.B. Ausdehnungsverhalten) äußerst schwierig zu verbinden sind, eine gute Fügealternative bieten. So wird in zahlreichen Arbeiten /5/, /6/ das Fügen von Oxid- und Nichtoxidkeramiken untereinander bzw. mit metallischen Werkstoffen untersucht. Das Löten kann sowohl auf konventioneller Weise mit metallisierter Oberfläche, über Diffusionslöten als auch mit Aktivloten erfolgen. So wird z.B. Nickel-Basis-Lot zum Verbinden von Siliziumnitrid-Molybdän-Verbunden (Anwendungstemperatur ca. 1200°C) und Silber-Kupfer-Basis-Aktivlot im Vakuumofen für Aluminium-Siliziumcarbid-Verbunde eingesetzt.

Ein weiteres vielversprechendes Gebiet erschließt sich für das Löten von Werkstoffen auf der Basis von intermetallischen Verbindungen, wie z.B. Titan- und Nickelaluminide. Diese Werkstoffe besitzen Eigenschaften, die zwischen denen der metallischen und der keramischen Werkstoffe liegen und eignen sich besonders für Anwendungen bei hohen Temperaturen (Turbinenbau). Zum Fügen der Aluminide sowohl artgleich als auch artfremd mit austenitischen oder warmfesten Stählen haben sich Nickelbasislote bewährt. Bei den Titanaluminiden (Ti46Al2NbCrMn, Ti48Al2Cr) erhält man hohe Scherfestigkeiten bei der Verwendung von Ni-Mn-Pd-Lot. Die Nickelaluminiden (NiAl) lassen sich gut mit Ni-Cr-Si-Lote fügen, /7/.

Für die form- und werkzeugfreie Fertigung von Bauteilen könnte die Löttechnik eine größere Bedeutung gewinnen. Nach einer vorausgegangenen CAD – Modellierung wird mit einem rechnergestützten Laser Sintering Prozess ein 3-D Bauteil gefertigt, welches dann aus einem porösen metallischen Werkstoff besteht. Ergänzt man diesen Bauprozess anschließend durch ein Benetzen mit Lot, so werden die Poren geschlossen und man erhält ein funktionsfähiges Bauteil. Auch die Fertigung von Gradientwerkstoffen lässt sich auf diesem Wege realisieren.

#### 5 Zusammenfassung

Das Löten ist in der Luftfahrtindustrie zum Verbinden unterschiedlicher und schwer benetzbarer Werkstoffe ein etabliertes stoffschlüssiges Fügeverfahren. Die neuen Impulse, die aus den Gebieten der Ingenieurkeramiken und intermetallischen Verbindungen kommen, werden weitere Entwicklungen speziell im Hochtemperaturbereich bewirken, beispielsweise für effiziente Brennkammer- und Turbinenbaugruppen. Auf diese Entwicklungen darf man sicherlich gespannt sein.

#### 6 Literatur

- /1/ N., N.: Löten, Allgemeines, Begriffe, DIN 8505 T 1, Beuth Verlag, 1979
- /2/ Wittke, K.: Verfahren der Löttechnik – von der Antike bis ins Industriezeitalter, Jahrbuch Schweißtechnik '97, S. 247-265, DVS Verlag Düsseldorf, 1997
- /3/ N., N.: Hart- und hochtemperaturgelötete Bauteile, DIN 65169, Beuth Verlag, 1986
- /4/ Adam, P.: Fertigungsverfahren von Turboflugtriebwerken, Birkhäuser Verlag, 1998
- /5/ Lugscheider, E.: Herstellungsmöglichkeiten von hochtemperaturbeständigen Verbunden nichtoxidischer Ingenieurkeramik mittels verschiedener Lotkonzepte, DVS Berichte, DVS-Verlag Düsseldorf, 1994
- /6/ Weise, W.; Malikowski, W.; Krappitz, H.: Verbinden von Keramik mit Keramik oder Metall durch Aktivloten unter Argon oder Vakuum, Degussa
- /7/ Lison, R.: Schweißen und Löten von Werkstoffen auf der Basis intermetallischer Phasen, Schweißen & Schneiden, S. 80-89, DVS-Verlag Düsseldorf, 2/2000

## Gleichmässigkeit zur Leistungssteigerung

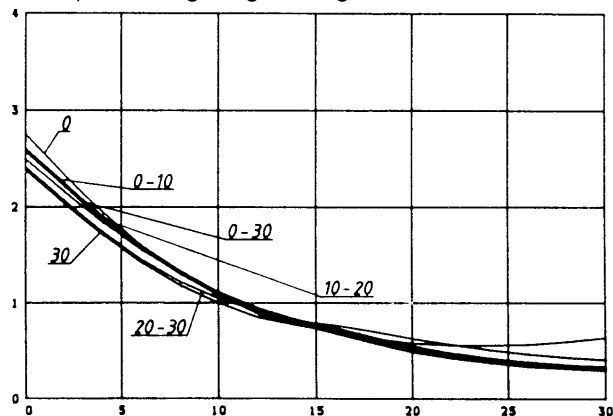
Schäfer, G.

*Die ungleichmässige Lastverteilung in formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen schränkt deren Übertragungsfähigkeit stark ein, da immer auf die höchstbeanspruchteste Stelle dimensioniert werden muss. Durch gezielte geometrische Korrekturen an den Formelementen kann das unterschiedliche Verformungsverhalten von Wellen und Naben ausgeglichen werden. Der Grundgedanke und die rechnerische Auslegung werden am Beispiel einer Zahnwellen-Verbindung beschrieben*

*Shaft-hub connections are often restrained by the non uniform load distribution. The calculation is focused on the peak of stress. The correction of the geometry may lead to a well-balanced connection regarding to load and elastic deformation. The fundamental idea and calculation will be described using a spline connection as example.*

### 1 Einleitung

Der Anlass für diesen kurzen Aufsatz sind Überlegungen zur Lastverteilung in Zahnwellen-Verbindungen von Herrn Huber, die dem Autor im Rahmen des DIN-Normenausschusses AA 2.7 „Berechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen“ überreicht wurden. Herr Huber ist pensionierter Mitarbeiter der John Deere Werke in Mannheim und ältestes Mitglied im DIN-Ausschuss AA 2.7. Herr Huber hat in seiner langjährigen Tätigkeit als Konstruktions- und Berechnungsingenieur vor etwa 25 Jahren eine Flankenlinienkorrektur zur gezielten Reduzierung von Lastüberhöhungen an der Drehmoment-Einleitungsseite der Verbindung (vgl. **Bild 1**) erstmalig vorgeschlagen.



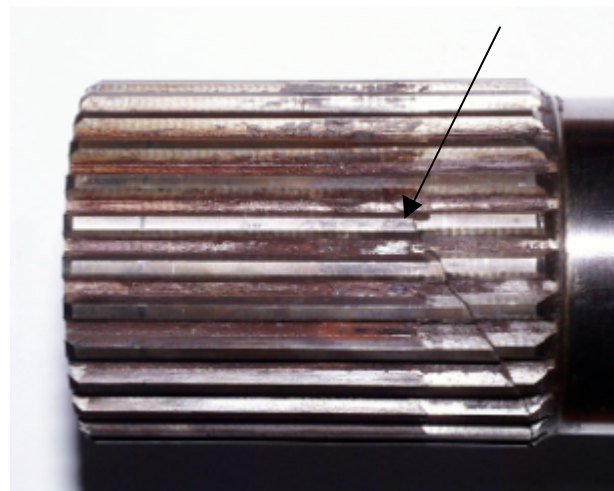
**Bild 1:** Lastüberhöhung an der Einleitungsseite

Aufbauend auf diesen Gedanken wird derzeit am Institut für Maschinenwesen die geometrische Berechnung der Flankenlinienkorrektur erweitert und der rechnerische Nachweis der Tragfähigkeitssteigerung mit den heute üblichen FEM-Berechnungen vorbereitet. Der experimentelle Nachweis der Wirksamkeit dieser Massnahme soll auf den Verspannungsprüfständen des Instituts zusätzlich erbracht werden.

### 1.1 Problemstellung

Für Zahnwellen-Verbindungen gibt es zwei wesentliche Ausfallkriterien. Dies sind zum einen der Flankenreibverschleiß und zum anderen die Gestaltfestigkeit von Welle und Nabe. Die Verschleißursachen wurden in dem FVA-Vorhaben Nr. 99 am IMW untersucht. Die Gestaltfestigkeit wurde ebenso am IMW in DFG-Vorhaben untersucht. Das in Bild 1 dargestellte Ergebnis gehört zu den DFG-Vorhaben.

Die Ergebnisse dieser beiden großen Untersuchungsprogramme wurden in Form der DIN 5466 Teil 1 und 2 /1, 2/ in eine Berechnungsvorschrift eingebracht. Aufgrund der in DIN 5480 /3/ genormten Geometrie kommt es aber immer wieder zu Schadensfällen mit folgendem Erscheinungsbild (vgl. **Bild 2**).



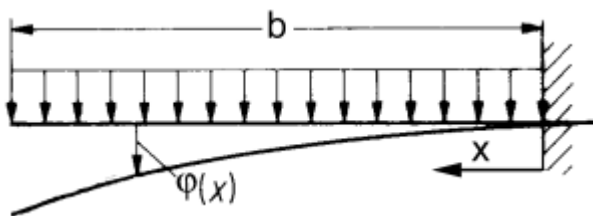
**Bild 2:** Torsionsbruch einer Zahnwelle an der Lasteinleitungsseite beginnend (Pfeil)

Es handelt sich hierbei um einen Torsionsbruch, dessen Ausgangsort an der Lasteinleitungsseite

der Verbindung im Zahnfuss liegt. Für die Behebung dieses Problems gibt es mehrere Wege, die auch kombiniert genutzt werden können. Eine Vergrößerung der Zahnfussausrundung bis hin zur vollen Abrundung reduziert die Kerbwirkung deutlich. Die Einbringung von Druckeigenspannungen, z.B. durch eine umformtechnische Herstellung, bringt Spannungsreserven in diesen gefährdeten Bereich. Die beiden genannten Möglichkeiten wirken über der gesamten Verbindungsbreite und ändern nichts an der grundsätzlichen Belastungsverteilung nach Bild 1. Die Ausnutzung einer solchen Verbindung ist optimierbar mit dem Ziel der gleichmässigen Lastverteilung über der Verbindungsbreite.

## 2 Lösungsansatz

Die lokale Spannungsüberhöhung an der Lasteinleitungsseite hat ihre Ursache in den nicht abgestimmten Verformungen der beiden Kontaktpartner Welle und Nabe. In vielen Fällen ist eine vollständige Abstimmung der Verformungen nicht möglich, was allein schon an den unterschiedlichen Torsionswiderstandsmomenten von Welle und Nabe liegen kann. Die Lösung dieses Problems ist die geometrische Anpassung der Flankenlinien unter Betriebslast. Das heisst, die Flankenlinien der Torsionsbeanspruchten Welle sollen unter Last ideale gerade Flankenlinien sein, da die Nabe dabei als ideal steifer Partner angenommen wird, was in erster Näherung vertretbar ist. Die Verteilung der Betriebslast wird dazu entsprechend der Zielvorstellung als konstant über der Verzahnungsbreite angenommen. Die Flankenlinien der lastfreien Welle müssen dazu die Gestalt der negativen Torsionsbiegeline erhalten (vgl. Bild 3).



**Bild 3:** Torsionsbiegeline bei konstanter Flankenlast als Aufsicht (x ist Achsrichtung)

### 2.1 Berechnung der Flankenlinie

Die Berechnung der Flankenlinie erfolgt nach den Ansätzen zur Berechnung der Torsionsverformung, die in /4/ und /5/ wiedergegeben sind.

Für ein vereinbarungsgemäss kontinuierlich über der Verbindungsbreite  $b$  verteiltes Drehmoment  $T$  berechnet sich der Verdrehungswinkel  $\varphi(x)$  nach folgender Formel:

$$j(x) = \frac{1}{G \cdot I_p} \int M_t(x) dx$$

$$\text{mit } M_t(x) = \frac{T}{b} \cdot x$$

$$j_{\max} = \frac{T \cdot b}{2 \cdot G \cdot I_p}$$

Der Werkstoff und das polare Widerstandsmoment sind dabei über der Verbindungsbreite als konstant angenommen worden, was in den meisten Anwendungsfällen zutreffend ist. Aus dem Verdrehungswinkel kann die Flankenrücknahme bezogen auf den Flankenmittenradius abhängig von der Verzahnungsbreitenkoordinate  $x$  berechnet werden.

## 3 Zusammenfassung

Die verformungsbezogene Flankenlinienkorrektur erlaubt es eine gleichmässige Flächenpressung über der Verbindungsbreite einzustellen. Auf diese Weise kann eine deutliche Tragfähigkeitssteigerung der Verbindung erreicht werden. Die Kontur kann mit den üblichen Fertigungsverfahren hergestellt werden und ist mit weiteren tragfähigkeitssteigernden Maßnahmen kombinierbar. Bei vergleichbarer Übertragungsfähigkeit ergeben sich deutlich niedrigere Flankenpressungswerte, die sich positiv auf das Betriebs- und Verschleissverhalten auswirken.

## 4 Literatur

- /1/ DIN 5466-1: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, Grundlagen, Beuth Verlag, Berlin 2000
- /2/ DIN 5466-2E: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480 (Gelbdruck), Beuth Verlag, Berlin 2000
- /3/ DIN 5480-1: Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken, Grundlagen, Beuth Verlag, Berlin 1998
- /4/ Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag Berlin, 16. Auflage 1987
- /5/ Issler, L.; Ruoff, H.; Häfele, P.: Festigkeitslehre - Grundlagen, Springer-Verlag Berlin, 1995

# Berechnungen mit der externen FEM-Approximation nach Apanovich

Müller, D.

*Der Anwendungsbereich der Methode der finiten Elemente ist sehr weit und vielseitig. Ebenso gibt es verschiedene Methoden, wie die Ansatzfunktionen der finiten Elemente konstruiert werden. Eine noch nicht so verbreitete neue Methode der finiten Elemente folgt einem Ansatz von Victor Apanovich. Bei der externen FEM-Approximation werden Ansatzfunktionen festgelegt, die einer notwendigen und hinreichenden Bedingung einer externen Approximation genügen.*

*The scope of the Finite Element Method is wide and versatile. There are also different methods for the assembling of basis functions for the finite elements. A new and yet not dispersed Finite Element Method follows the approach of Victor Apanovich. The external FEM-Method is based on basis functions that suffice the condition of an external approximation.*

## 1 Einleitung

Im Rahmen der Diplomarbeit *Untersuchungen zu externen FEM-Approximationen nach Apanovich* /6/, die am Institut für Maschinenwesen unter Zusammenarbeit mit dem Institut für Mathematik durchgeführt worden ist, ging es um eine mathematische Beschreibung und erste Anwendung der Methode der externen FEM-Approximation, die Victor Apanovich 1991 in seiner Arbeit /1/ vorgestellt hat.

Dieser Beitrag ist als einführende Motivation in das Thema der externen FEM-Approximation gedacht und gibt einen ersten Einblick anhand einer Modellaufgabe. Die vollständigen theoretischen Grundlagen für die FEM-Approximation, sowohl klassisch und auch extern, würden den Rahmen dieses Beitrags sprengen. Ausführlicher werden diese Grundlagen in der Diplomarbeit oder der angegebenen Literatur /3,4/ behandelt.

## 2 Grundlagen der klassischen und externen FEM-Approximation

Probleme aus der mathematischen Physik sind oft durch eine Differentialgleichung in Verbindung mit Rand- und eventuell Anfangsbedingungen charakterisiert. Bisher wurden vorwiegend zwei Lösungswege beschritten.

Zum einen gibt es die Möglichkeit der Findung einer geschlossenen Lösung eben dieser Differentialgleichung. Zum anderen ist die Methode der finiten Elemente weit verbreitet, die im Grunde ein Verfahren von RAYLEIGH-RITZ bei quadratischen Extremalproblemen ist, wobei jedoch spezielle Ansatzfunktionen verwendet werden. Jede Ansatzfunktion ist dabei eine Funktion, die nur in einem Teilgebiet  $K^j \subset \Omega$  von Null verschiedene Werte annimmt und außerhalb identisch Null ist. Eine so definierte Ansatzfunktion besitzt nur einen kleinen Träger. Somit enthalten die bei der Diskretisierung entstehenden Matrizen nur wenige von Null verschiedene Einträge. Damit hängt die numerische Stabilität des Verfahrens zusammen.

Die Methode der externen FEM-Approximation ist in wesentlichen Zügen mit der klassischen Methode der finiten Elemente verwandt. Sie basiert ebenso auf einem speziellen RAYLEIGH-RITZ-Verfahren. Mit Ausnahme der Prozedur der Konstruktion von speziellen finiten Elementen, ist das rechnerische Verfahren der externen Methode analog zur klassischen Methode.

Die abweichende Konstruktion der finiten Elemente in der externen FEM-Approximation erzeugt Ansatzfunktionen, die einer externen Approximation entsprechen. Eingeführt wurde die Definition einer externen Approximation 1964 von Jean Céa /2/.

In der klassischen Methode der finiten Elemente ist ein endlich dimensionaler finiter Elemente-Raum  $X_h$  ein linearer Unterraum des linearen Lösungsraums  $V$ :

$$X_h \subset V.$$

In der externen FEM-Approximation verzichtet man jedoch auf die Erfüllung der obigen Inklusion. „Extern“ bedeutet dabei, daß der Approximationsraum  $X_h$  kein Unterraum von  $V$  ist:

$$X_h \not\subset V.$$

Die Näherungslösung wird in  $X_h \subset \bar{V}$  gesucht.  $\bar{V}$  enthält  $V$  als abgeschlossenen Teilraum. Die Lösungsfunktion wird also quasi 'von außen' angenähert.

Das Verfahren der externen FEM-Approximation soll im Folgenden an einer einfachen Modellaufgabe veranschaulicht werden.



### 3 Modellaufgabe

#### 3.1 Aufgabenstellung

Es wird der Fall einer quadratischen Platte unter Einwirkung einer Einheitsverschiebung im Mittelpunkt betrachtet. Durch die Belastung erfährt die Platte eine Verformung, die berechnet werden soll.

Die Lösung des homogenen DIRICHLETschen Randwertproblems kann auf zwei äquivalente Weisen definiert werden:

1. Randwertproblem:

$$-\Delta u = f \text{ in } \Omega$$

2. Variationsaufgabe:

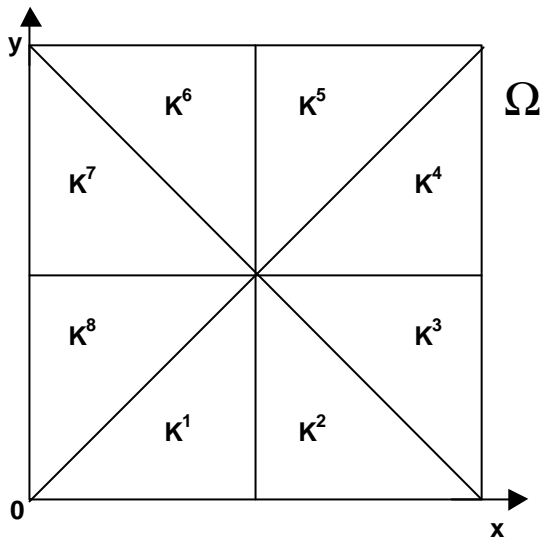
$$\int_{\Omega} \text{grad} \cdot u * \text{grad} \cdot v d(x, y) = \int_{\Omega} f v d(x, y), \forall v \in H_0^1(\Omega)$$

Das betrachtete Gebiet  $\Omega$  ist ein Quadrat mit der Kantenlänge 1:

$$\Omega \subset \mathbb{R}^2 = (0,1)^2$$

Die Funktion  $f$  wird als identisch 1 vorausgesetzt.

Die Approximation der Lösung des Randwertproblems wird mit im Unterraum übereinstimmenden finiten Elementen durchgeführt. Dies sind spezielle finite Elemente, deren Ansatzfunktionen der Bedingung der externen Approximation genügen.



**Bild 1:** Beispielelementierung des Gebiets  $\Omega$

Für die Elementierung des Gebiets  $\Omega$  wurde jeweils eine Triangulierung  $\tau$  gewählt. Zur Veranschaulichung beschränken wir uns zuerst auf eine Elementierung, die das Gebiet in acht Dreiecke mit gleicher Fläche zerlegt (vgl. Bild 1):

$$\tau = \{K^1, \dots, K^8\}.$$

Für eine verbesserte Approximation wurde noch eine Triangulierung mit 102 Elementen gerechnet.

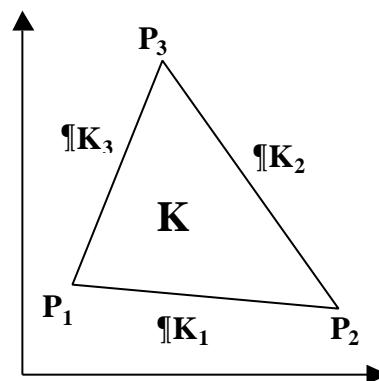
Für die Approximation der gesuchten Lösung wählen wir einen linearen Ansatz auf allen Elementen. Die allgemeine Form der Polynome lautet:

$$u(x, y) = c_1 + c_2 x + c_3 y, u \in P_1(K)$$

Das Spezielle bei der externen FEM-Approximation ist, daß die Ansatzfunktionen nur über den Rändern der finiten Elemente Werte ungleich Null annehmen. Jede Kante eines Dreiecks  $\partial K_r$  entspricht einem Wegelement  $K_r$  der Triangulierung  $\tau$ :

$$\partial K_r \subset K \in \tau, 1 \leq r \leq 3$$

Für den linearen Ansatz besitzt das im Unterraum übereinstimmende finite Element drei Randfreiheitsgrade, entsprechend jeder Dreiecksseite.



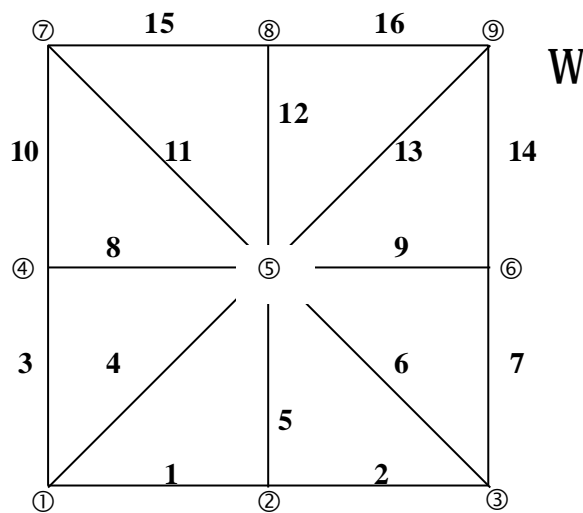
**Bild 2:** Bezeichnungen am finiten Element

#### 3.2 Festlegungen am finiten Element

Jedes Dreieck ist durch seine drei Eckpunkte eindeutig bestimmt. Diese Punkte werden als Knoten  $P$  bezeichnet (vgl. Bild 2). Die Kanten des Dreiecks, das sind die Strecken zwischen den Knoten, werden bei der externen FEM-Approximation zusätzlich mit  $\partial K$  bezeichnet (vgl. Bild 2).

Über den Kanten werden die Freiheitsgrade bestimmt. Entsprechend ihrer Anordnung erfolgt die Zuordnung bei der Kompilation der Gesamtsteifigkeitsmatrix. Die globale Numerierung der Kanten und der Knoten des zerlegten Gebiets  $\Omega$  ist in Bild 3 dargestellt.

Die Reihenfolge der Knoten und Kanten, die zu einem Element gehören ist mathematisch positiv angeordnet. Entsprechend der Reihenfolge der Knoten werden auch die Kantennummern angegeben. Die erste Kante liegt zwischen dem ersten und zweiten Knoten, die beiden anderen Kanten folgen im mathematisch positiven Sinn. Das finite Element  $K^1$  besteht zum Beispiel aus den Knoten 5,1,2 und den Kanten 4,1,5.



**Bild 3:** Numerierung der Referenzen, mit  
 ①: Knotennummer;  
 1: Kantennummer.

### 3.3 Ablauf der Berechnung

Die Berechnung der Freiheitsgrade und Kompilation der Gesamtsteifigkeitsmatrix ist für die acht Elemente noch von Hand lösbar. Der Ablauf der Berechnung soll hier aber nur kurz skizziert werden.

Nach der Festlegung der Geometriedaten und Zuordnung der Numerierung können die Randfreiheitsgrade bezüglich einer Standardbasis bestimmt werden. Als Standardbasis für den linearen Ansatz wurden die Funktionen  $\{1, x, y\}$  auf allen Elementen gleich gewählt.

Die allgemeine Definition der Freiheitsgrade für zweidimensionale im Unterraum übereinstimmende finite Elemente lautet:

$$\forall p \in P: \mathbf{j}(p) = \int_{\partial K_r} g(t) \cdot \mathbf{g}_r^K p d\mathbf{g}, 1 \leq r \leq 3$$

Die Funktion  $g(t)$  ist für die Beispielaufgabe identisch 1.  $\gamma(p)$  entspricht der Parametrisierung der Basisfunktionen entlang der entsprechenden Kantenwege. Über jeder Kante des finiten Elements werden bezüglich jeder Basisfunktion die Randfreiheitsgrade berechnet. Die einzelnen Ergebnisse setzen sich in einer Elementmatrix der Dimension  $3 \times 3$  zusammen.

Matrixinversion der Elementmatrizen ergibt die Koeffizienten  $r_{ik}$ , die mit den Ausgangsbasisfunktionen  $p_i$  als Linearkombination die Elementformfunktionen des finiten Elements bestimmen:

$$p = \sum_{i=1}^3 p_i r_{ik}.$$

Entsprechend der Variationsgleichung, die der Aufgabe zugrunde liegt, werden nun unter Einbezug der Elementformfunktionen die einzelnen Integrale berechnet. Dies liefert die jeweiligen Elementsteifigkeitsmatrizen und -vektoren.

Die Kompilation der Gesamtsteifigkeitsmatrix und des Gesamtvektors ist der letzte Rechenschritt vor dem Lösen des linearen Gleichungssystems. Dabei werden die Beiträge der einzelnen Elemente, die in den Elementsteifigkeitsmatrizen und -vektoren als Werte vorliegen, zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix  $A$  und einem Gesamtvektor  $b$  mit einem speziellen Verfahren zusammengefaßt. Unter Berücksichtigung der gewählten Numerierung der am Element beteiligten Kantenvariablen werden die Beiträge durch Superposition zusammengefaßt. Jeder Träger liefert einen Eintrag in der Matrix bzw. dem Vektor.

Element	Kanten			Knoten		
	1	2	3	1	2	3
1	4	1	5	5	1	2
2	6	5	2	3	5	2
3	5	3	6	6	7	9
4	13	9	14	9	5	6
5	13	16	12	5	9	8
6	11	12	15	7	5	8
7	11	10	8	5	7	4
8	4	8	3	1	5	4

**Tab. 1:** Übersicht Numerierung der Beispielscheibe

Der Kompilationsprozess lässt sich ganz allgemein wie folgt beschreiben: Steht in der Liste (vgl. Tab. 1) der Nummern der Kantenvariablen an der Position  $j$  die Nummer  $l$  und an der Position  $k$  die Nummer  $m$ , so ist beispielsweise der Wert des Elementes  $s_k$  der Elementsteifigkeitsmatrix  $S_e$  zum Element  $a_m$  der Gesamtsteifigkeitsmatrix  $A$  zu addieren. Ferner ist die Komponente  $b_j$  des Elementvektors  $b_e$  zur Komponente  $b_l$  des Gesamtvektors  $b$  zu addieren.

Dies liefert uns für das Beispiel eine Gesamtsteifigkeitsmatrix der Dimension  $16 \times 16$  und einen Gesamtvektor der Dimension 16. Die Randbedingung  $u = 0$  auf  $\partial\Omega$  der Beispielaufgabe sorgt dafür, daß das lineare Gleichungssystem auf die Berechnung der Variablen der acht inneren Kanten reduziert werden kann. Die Variablen der äußeren Kanten besitzen den Wert Null.

Die Lösung des linearen Gleichungssystems

$$A x = b$$

liefert den globalen Kantenvariablenvektor  $x$ . Eine Linearkombination der Ansatzfunktionen bestimmt die Approximationsfunktion.

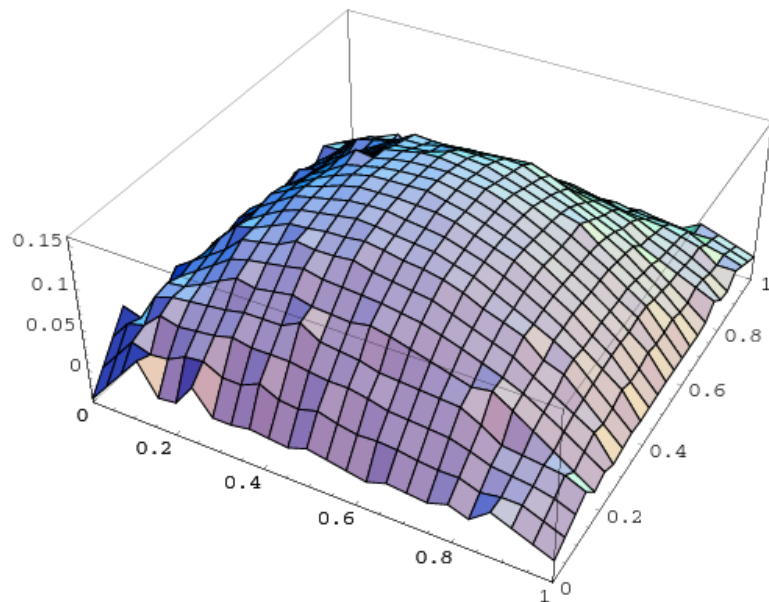
#### 4 Ergebnisse und Folgerungen

Die Programmierung der externen FEM-Approximation erfolgte mit Hilfe des mathematischen Rechenprogramms MATHEMATICA, vgl. /5/.

Schon mit wenigen Elementen und linearen Ansatzfunktionen wurden gute Approximationen erreicht, die der klassischen Theorie entsprechen. Die Güte der Approximation nimmt mit zunehmender Elementzahl und höherer Ordnung des Ansatzes schnell zu.

Aufgrund des Ansatzes ist die Approximationsfunktion nicht zwangsläufig stetig. Für eine Angleichung müßten separate Algorithmen angewandt werden. Der Verzicht auf Stetigkeit ermöglicht aber eine leichtere bzw. schnellere Wahl der Ausgangsbasisfunktionen der finiten Elemente, was einen Vorteil dieser Methode darstellt.

Die beiden AusgabepLOTS von den Zerlegungen in acht (vgl. Bild 4) und der in 102 Elemente (vgl. Bild 5) bilden die Approximationsfunktion ab.



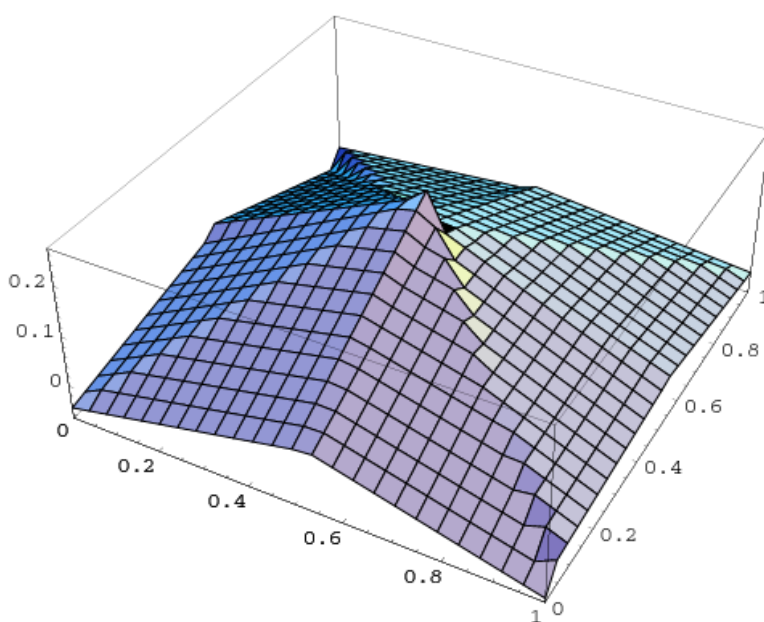
**Bild 5:** Ergebnisplot 102 Elemente

#### 5 Zusammenfassung

Die externe FEM-Approximation basiert auf dem gleichen theoretischen Ansatz der klassischen Methode. Jedoch werden als Freiheitsgrade die Kanten der finiten Elemente und nicht die Knoten gewählt. Die Ansatzfunktionen genügen einer notwendigen und hinreichenden Bedingung einer externen Approximation, was eine einfachere Wahl der Ausgangsbasisfunktionen ermöglicht. Folge ist ein Approximationsraum, der kein Unterraum des linearen Lösungsraums ist.

#### 6 Literatur

- /1/ Apanovich, V.; The method of external Finite Element Approximation, Minsk 1991, ISBN 5-339-00597-6
- /2/ Ce'a, J.; Approximation variationnelles des problemes aux limites, Ann. Inst. Fourier 1964 Vol. 14, pp. 345-444
- /3/ Knothe, K., Wessels, H.; Finite Elemente, Berlin: Springer-Verlag 1991
- /4/ Schwarz, H.; Methode der Finiten Elemente, Stuttgart: Teubner 1991
- /5/ Wolfram, S.; Mathematica – A system for doing Mathematics by Computer, Addison-Wesley 1991
- /6/ Müller, D.; Untersuchungen zu externen FEM-Approximationen nach Apanovich, Diplomarbeit am IMW TU Clausthal 1999



**Bild 4:** Ergebnisplot acht Elemente

# Methodische Ansätze zur Werkstoffauswahl

Große, A.

*Es gibt verschiedene Vorgehensweisen zur Bestimmung des geeigneten Werkstoffs für eine Konstruktion. Der folgende Beitrag stellt einen Auszug aus bestehenden Ansätzen zur Werkstoffauswahl vor.*

*Different ways to find out the best material for a design are existing. In the following some possibilities for materials selection are presented.*

## 1 Einleitung

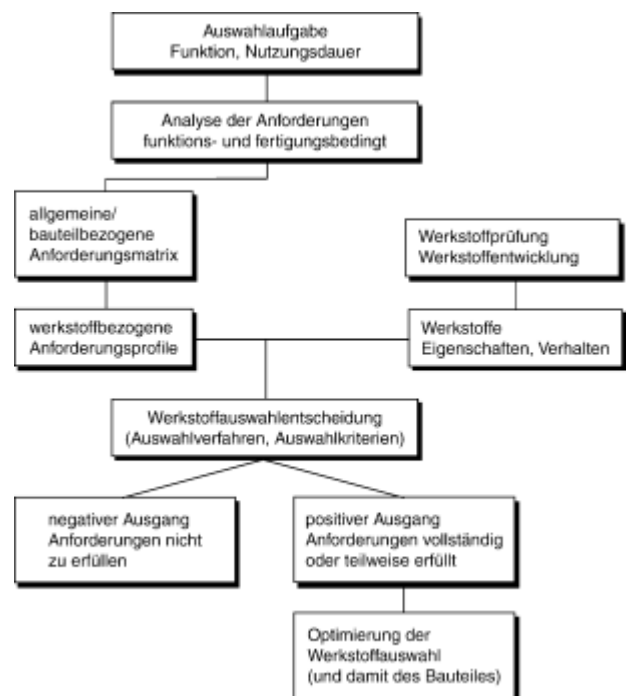
Im Folgenden sollen einige methodische Ansätze zur Werkstoffauswahl vorgestellt und diskutiert werden. Neuere Beiträge und Veröffentlichungen zu diesem Thema sind fast nur noch im angelsächsischen Bereich zu finden. Die verschiedenen Vorgehensweisen stammen überwiegend aus den 80er-Jahren (vgl. z.B. /1, 2, 3, 4/), besitzen aber aufgrund ihrer allgemeinen Abfassung nach wie vor ihre Gültigkeit und Anwendbarkeit. Allerdings handelt es sich heutzutage um einen deutlich schwierigeren Auswahlvorgang, da eine unüberschaubare Menge an Werkstoffen am Markt vorhanden ist und diese durch zahlreiche Werkstoffneuentwicklungen ständig wächst. Auch die recht neuen Verbundwerkstoffe mit ihren ungezählten Kombinationsmöglichkeiten erschweren den Auswahlprozess. Die neu eingeführten Werkstoffbezeichnungen nach Europäischer Norm bereiten oftmals zusätzliche Schwierigkeiten. Dadurch rückt eine optimierte Informationsgewinnung und zielgerichtete Informationsbereitstellung immer stärker in den Vordergrund, die ohne Rechneranwendungen kaum noch zu bewältigen sind. Der Wunsch zum vermehrten Rechnereinsatz in der Werkstoffinformation und -auswahl ist deutlich erkennbar (vgl. auch /5/).

## 2 Generelle Vorgehensweisen zur Werkstoffauswahl

Unter generellen Vorgehensweisen zur Werkstoffauswahl sollen diejenigen verstanden werden, die einen geringen Konkretisierungsgrad und eine hohe Allgemeingültigkeit besitzen. Sie zählen im Wesentlichen die grundsätzlich auszuführenden Arbeitsschritte auf.

### 2.1 Vorgehensweise nach Grosch

Grosch /2/ beschreibt eine allgemein gültige Vorgehensweise zur Werkstoffauswahl. Die erforderlichen Teilschritte zur Ermittlung des optimalen Werkstoffs, die unabhängig von der Konstruktion aufgabe sind, können aus **Bild 1** entnommen werden.



**Bild 1:** Grundsystem der Werkstoffauswahl nach /2/

Kern dieser Vorgehensweise ist die Erstellung eines werkstoffspezifischen Anforderungsprofils und dessen Vergleich mit den relevanten Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Werkstoffe. Aus der Analyse der Auswahlaufgabe gehen funktions- und fertigungsbedingte Anforderungen hervor. Grosch unterscheidet des Weiteren zwischen invarianten (unbedingt einzuhalten) und varianten (Bereiche oder Minimalwerte) Anforderungen, die gleichbedeutend mit invarianten und varianten Eigenschaften sind. Unter Verwendung ausgewählter technischer und wirtschaftlicher Kriterien wird mittels Bewertungsverfahren der Werkstoff, der die Anforderungen vollständig oder am besten erfüllt, herausgestellt. Ein negatives Vergleichsergebnis kann

eine Werkstoff- bzw. Fertigungsverfahrensentwicklung zur Folge haben, sofern der Aufwand hierfür gerechtfertigt ist.

In Abhängigkeit von der Art der Werkstoffauswahl (Auswahl bei der Entwicklung neuer Produkte oder Auswahl bei bereits in der Fertigung befindlicher Erzeugnisse) ist das in **Bild 1** dargestellte Grundsystem zu detaillieren.

Bei Produktneuentwicklungen werden in einem ersten Schritt die invarianten Anforderungen mit den entsprechenden Eigenschaften der Werkstoffe durch Ja-Nein-Entscheidung verglichen, wodurch die Anzahl der möglichen Werkstoffe erheblich reduziert wird. Danach werden die varianten Anforderungen für einen weiteren Vergleich herangezogen.

Ausschlaggebend für die Suche nach einem anderen Werkstoff für ein bestehendes Produkt können Konstruktionsmodifikationen oder Änderungen des Fertigungsverfahrens (neue Fertigungsbedingungen oder neues Verfahren), aber auch neue Werkstoffe am Markt oder Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sein. So kann beispielsweise bei einer veranlassten Verkürzung der Produktlebensdauer in der Regel auch ein kostengünstigerer Werkstoff eingesetzt werden.

Zur Beurteilung der Werkstoffauswahl hat Grosch auf der technischen Seite die Systembegriffe *Bauteileigenschaften* und *Bauteilverhalten* eingeführt. Während die Bauteileigenschaften die Erfüllung der

technischen Funktionen eines Bauteils umfassen, verkörpert das Bauteilverhalten die Erfüllung der technischen Funktionen eines Bauteils über die gesamte Nutzungsdauer. Analog werden auf der wirtschaftlichen Seite die Begriffe *Bauteilkosten* und *Bauteilwirtschaftlichkeit* eingeführt. Die Bauteilkosten beinhalten die Entwicklungs-, Werkstoff- und Fertigungskosten, die Bauteilwirtschaftlichkeit schließt die Bauteilkosten und die mit der Nutzung verbundenen Kosten ein.

## 2.2 Vorgehensweise nach Ehrlenspiel und Kiewert

Das von Ehrlenspiel und Kiewert in /6/ vorgestellte methodische Vorgehen zur Werkstoffauswahl enthält sowohl eine generelle Vorgehensweise, als auch detailliertere Einzelmethoden zur Bestimmung des optimalen Werkstoffs. Durch eine methodische Werkstoffauswahl sollen im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt werden. Zum einen ist eine Werkstoffinnovation herbeizuführen, die sich sowohl auf das Produkt als auch auf den Werkstoff selbst beziehen kann. Zum anderen soll eine erhöhte Auswahlisicherheit gewährleistet werden.

Die allgemeine Vorgehensweise mit den entsprechenden Hilfsmitteln, die auf dem „Problemlösungszyklus“ der Systemtechnik basiert, ist in **Tab. 1** dargestellt. Die Ausführung und Ergebnisse der einzelnen Grundschriffe können auch hier wieder

Grundschriffe	Hilfen zur Werkstoffwahl
1. Aufgabe klären	Klärung der Anforderungen an den Werkstoff Anforderungsliste/Pflichtenheft erstellen. Schwerpunktbildung aus Schadensberichten, Analysen ähnlicher Produkte (Vorgänger-, Konkurrenzprodukte), Kosten-, Zuverlässigkeitsstrukturen. ABC-Analysen durchführen für Baugruppen, Bauteile, Funktionen. Werkstoffanforderungsprofil erstellen.
2. Lösungssuche	Suche nach möglichen Werkstoffen Werkstoffkataloge, Regelwerke, Datenbanken, Brainstorming, Gespräche mit Fachleuten
3. Analyse	Ermittlung der Eigenschaften Berechnungen: Festigkeit, Kosten, Versuche: Elementar-, Bauteilversuche, Einsatzspezifische Versuche an Prüfständen oder beim Kunden, Vergleich mit ähnlichen Produkten.
4. Bewertung und Entscheidung	Ermittlung der Eigenschaften der Werkstoffalternativen Anforderungs-/Eigenschaftsliste, gewichtete Punktbewertung, Nutzwertanalyse, Expertengespräche, Werkstoffentscheidungsteam, Chefentscheidung

**Tab. 1:** Allgemeine Problemlösungsmethode mit Hilfen zur Werkstoffauswahl der Konstruktion /6/

Rücksprünge implizieren.

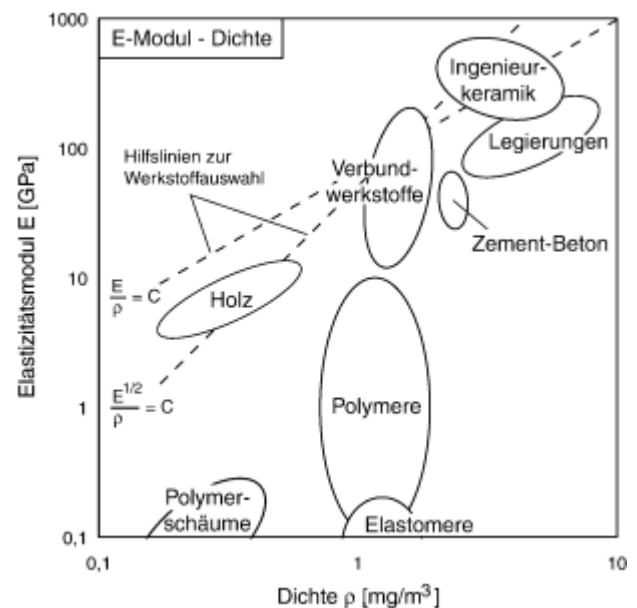
Als Werkzeug für den ersten Schritt «Aufgabe klären» haben Ehrlenspiel und Kiewert eine Checkliste mit zahlreichen Werkstoffeigenschaften entwickelt. Hierin wird nach den Kategorien «Gebrauchseigenschaften», «Fertigungseigenschaften», «Kosten» und «Termine» unterschieden. Bei einer gewünschten Werkstoffsubstitution ist zur Ermittlung der Ansatzpunkte als Erstes eine ABC-Analyse durchzuführen. Bei der Suche nach Lösungen helfen ebenfalls Checklisten, aber auch Kataloge oder intuitive Verfahren wie etwa Brainstorming. Zum Bestand der Hilfsmittel gehört u.a. auch eine Art Checkliste zum Senken der Materialkosten. Die Kosten bei der Produktentwicklung stehen in den Arbeiten von Ehrlenspiel stets im Vordergrund (vgl. z.B. /7, 8/). Als Hilfen für die Analyse der Eigenschaften verschiedener Werkstoffalternativen dienen Berechnungen und Versuche. Abschließend wird zur Entscheidungsfindung eine Bewertung der analysierten Werkstoffe durchgeführt. Die Werkstoffvariante, deren Eigenschaftsprofil dem geforderten Anforderungsprofil am nächsten kommt, ist die beste Wahl. Nach Möglichkeit sollte die Entscheidung nicht von einer Einzelperson, sondern von einem aus verschiedenen Disziplinen zusammengesetzten Team getroffen werden.

### 3 Werkstoffauswahl mit Werkstoff-schaubildern

Eine deutlich von den bisher beschriebenen Ansätzen abweichende Vorgehensweise zur Werkstoffauswahl hat Ashby /9/ entwickelt. Grundidee dabei ist die Auswahl mithilfe von Werkstoff-schaubildern, in denen zwei Werkstoffeigenschaften logarithmisch gegeneinander aufgetragen werden, **Bild 2**. Es ist erkennbar, dass die einzelnen Werkstoffarten (z.B. Polymere) aufgrund ähnlicher Eigenschaften so genannte Cluster bilden.

Je nachdem unter welcher Prämisse eine Optimierung stattfinden soll, sind andere Werkstoffeigenschaften ausschlaggebend. So ist beispielsweise der leichteste auf Zug beanspruchte Stab derjenige, der das größte Verhältnis von Streckgrenze zu Dichte ( $R_{eH}/\rho$ ) besitzt, oder der Werkstoff mit der besten Temperaturwechselbeständigkeit derjenige, der den größten Wert für  $\sigma_b/E\alpha$  ( $\sigma_b$  Bruchspannung,  $E$  Elastizitätsmodul,  $\alpha$  linearer Wärmeausdehnungskoeffizient) aufweist. Für die Werkstoffauswahl im

Maschinenbau sind im Wesentlichen zwölf Eigenschaften von Bedeutung /9/. Ashby stellt für diese relevanten Eigenschaften und ihre sinnvollen Kombinationen Werkstoff-schaubilder zur Verfügung.



**Bild 2:** Werkstoff-schaubild nach Ashby (Performance Index  $E/\rho$  ist Indikator für leichte und steife Bauteile) /9/

Diese Vorgehensweise ist in erster Linie für die Auswahl einer Werkstoffart, wie etwa Polymere, gedacht und unterstützt damit mehr die frühen Phasen der Produktentwicklung. Die Werkstoffauswahl mit Werkstoff-schaubildern nach Ashby ist in einer Software namens «Cambridge Materials Selector» umgesetzt worden /10/. Diese erlaubt auch eine detailliertere Werkstoffauswahl.

### 4 Werkstoffauswahl mit Kennzahlverfahren

Zur Werkstoffauswahl werden auch Methoden angewendet, die mit der Bildung von Kennzahlen arbeiten. Damit wird es möglich, die Werkstoffalternativen quantitativ miteinander zu vergleichen. Allerdings gilt dies nur, sofern die Anforderungen und Eigenschaften auch quantitativer Art sind. Aus der Literatur sind z.B. die Zielbaum-Methode, der MWC-Wert (Mean Weighted Characteristics) oder der kostenbezogene Gebrauchswertfaktor  $\eta$  nach Schott bekannt /11/. **Tab. 2** zeigt die einzelnen Kennzahlen einschließlich ihrer Berechnungswege.

Kennzahl	Formel	Formelzeichen
Z	$Z_i = \frac{\sum_{j=1}^q f_j \cdot B_{j,i}}{A_j + \sum_i B_{j,i}}$	$Z_i$ Zielbaum-Wert $MWC_i$ Mean Weighted Characteristics-Wert $\eta_i$ Kostenbezogener Gebrauchswert
MWC	$MWC_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^q f_j} \sum_{j=1}^q f_j \frac{B_{j,i}}{A_j}$	$A_j$ j-ter Anforderungswert von insgesamt q Anforderungen $B_{j,i}$ j-ter Eigenschaftswert des i-ten Werkstoffs von insgesamt p Werkstoffen, die in die Auswahl einbezogen sind
$\eta$	$\eta_i = \frac{G_{w,i}}{K_i} = \frac{1}{K_i} \sum_{j=1}^q f_j \frac{B_{j,i}}{A_j}$	$f_j$ Wichtungsfaktor der j-ten Anforderung $G_{w,i}$ Gebrauchswertfaktor des i-ten Werkstoffs $K_i$ Kosten des i-ten Werkstoffs

**Tab. 2:** Gegenüberstellung von Kennzahlen zur Werkstoffauswahl (nach /11/)

Im Wesentlichen unterscheiden sich die vorgestellten Kennzahlenverfahren in der Berücksichtigung der Kosten. Bei der Zielbaum-Methode werden die Kosten gesondert betrachtet, beim MWC-Verfahren sind sie einem Eigenschaftswert gleichgestellt und beim  $\eta$ -Verfahren wird die Summe aller technischen Erfüllungsgrade auf die zugehörigen Kosten bezogen. Die Ergebnisinterpretation sollte sorgfältig vorgenommen werden, da die Anwendung der einzelnen Verfahren auf eine Kombination von Werkstoffalternativen sehr unterschiedliche Rangfolgen ergeben kann /11/.

## 5 Zusammenfassung

Der Beitrag hat verschiedene Möglichkeiten zur Werkstoffauswahl beschrieben. Generelle Vorgehensweisen beinhalten die auszuführenden Arbeitsschritte. Die Auswahl mit Werkstoffschaubildern erlaubt eine grafische Werkstoffsuche. Mithilfe von Kennzahlenverfahren bzw. der Bildung von Kennzahlen kann die Werkstoffeignung quantitativ ausgedrückt werden.

## 6 Literatur

- /1/ Illgner, K. H.: *Werkstoffauswahl für den Konstrukteur*. VDI-Z 121 (1979) Nr. 20 – Oktober (II), S. 1027-1030
- /2/ Grosch, J. (Hrsg.): *Werkstoffauswahl im Maschinenbau*. Sindelfingen: Expert Verlag, 1986 (Kontakt & Studium Band 199)
- /3/ Charles, J. A.: *Interaction of design, manufacturing method, and material selection*. Materials Science and Technology Vol. 5 (1989) June, pp 509-516
- /4/ Ashby, M. F.: *Materials selection in conceptual design*. Materials Science and Technology Vol. 5 (1989) June, pp. 517-525
- /5/ Große, A.: *Analyse der Werkstoffauswahl in der industriellen Praxis und Konsequenzen für die rechnerunterstützte Stahlauswahl*. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal Nr. 22 (1997)
- /6/ Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.: *Die Werkstoffauswahl als Problem der Produktentwicklung im Maschinenbau*. VDI Berichte Nr. 797, 1990
- /7/ Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 3. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 1999
- /8/ Pahl, G.; Beitz, W.: *Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung*. 4. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 1997
- /9/ Ashby, M. F.: *Materials selection in engineering design*. Indian Journal of Technology Vol. 28 (1990) June-August, pp. 217-225
- /10/ Cebon, D.; Ashby, M. F.: *Computer aided materials selection for mechanical design*. Metals and Materials Vol. 8 (1992) January, pp. 25-30
- /11/ Schott, G.: *Gegenüberstellung bekannter Werkstoffauswahlverfahren*. 1981

# Der Einfluss des Rapid Prototyping auf die Produktentwicklung

Klemp, E.

*Die Entwicklung neuer Produkte ist durch das Verständnis des Auftraggebers und Auftragnehmers gekennzeichnet. Der Einsatz von Bauteilen, die mit dem Rapid Prototyping Verfahren hergestellt werden verbessert nicht nur die Anschauung und vermittelt haptische Eindrücke, die Zeit bis zur Markteinführung sinkt bei einer deutlich reduzierten Fehlerrate. Ergänzend erweist sich die Kombination von Rapid Prototyping und „Simultaneous Engineering“ im Rahmen der Produktentwicklung als sehr vorteilhaft.*

*The development of new products is determined by the relation and understanding between customer and designer. The use of Rapid Prototyping techniques improves on the one side the visualisation and allows a physical impression, it also results in a shortening of „time to market“ and reduction of failures. In combination with simultaneous development, the Rapid Prototyping technique seems to have an enormous benefit for the next years in product development.*

## 1 Einleitung

Um als Unternehmen auf dem Markt erfolgreich zu sein, muss es dafür garantieren, dass seine Produkte die Wünsche und Bedürfnisse seiner Kunden befriedigen. Zu diesen Wünschen zählt unter anderem, dass die Produkte zur rechten Zeit (meist zum kurzfristigsten Termin), in der bestmöglichen Qualität und am rechten Ort zur Verfügung stehen. Von besonderer Bedeutung ist für das Unternehmen der zu erzielende Preis, zu dem sich das Produkt verkaufen lässt und eine fehlerfreie Auslieferung in der von Kunden gewünschten Qualität und Funktionalität. Durch die in vielen Fällen vorhandenen Konkurrenzsituation ist jedes Unternehmen gezwungen, jedem dieser Ziele eine hohe Bedeutung beizumessen und durch geeignete Vorgehensweisen und Maßnahmen die Erfüllung der Erwartungen zu garantieren.

Aus diesen Gründen ist für die Entwicklung eines neuen Produktes eine gesamthafte Betrachtung des Produktentwicklungs- und Fertigungsprozesses notwendig, unterstützt durch ein systematisches Vorgehen. Gerade im Bereich der Neuentwicklungen

liegt häufig ein komplexes Gebilde von Wünschen, Anforderungen, Funktionalitäten etc. vor, so dass der Entwicklungsprozess selbst zum erfolgsbestimmenden Faktor wird. Unter Anwendung moderner Vorgehensweisen und unter Berücksichtigung der VDI 2221 liegt eine Methodik vor, die es erlaubt, unter Einbeziehung aller Anforderungen und Wünsche, möglichst rasch zu einem besten Ergebnis zu gelangen und die Zeit bis zur Markteinführung so kurz wie möglich zu halten.

## 2 Die Umsetzung einer Idee

Der Weg von der Idee zum Produkt ist durch das Verhältnis vom Auftraggeber zum Auftragnehmer gekennzeichnet. Einerseits ist der Kunde ein entscheidender Faktor, denn er kann maßgeblich zur schnellen Realisierung und dem Erfolg beitragen. Entschränkend zeigt sich aber, dass er meist nicht über das Wissen der Techniker oder Konstrukteure verfügt, sodass sich der Auftragnehmer der Tatsache gegenüber sieht, dass Kenntnisse über die Vorgänge bei der Konstruktion und der Entstehung von Produkten fehlen. Gerade deshalb muss der Kunde sich sehr genau über das gewünschte Produkt, seiner konkreten Funktion und den Einsatzbedingungen im Klaren sein, denn durch seine Vorstellung trägt er zum Erfolg des Produktes (der Befriedigung seiner eigenen Bedürfnisse) und seiner möglichen Realisierung bei.

Auf der anderen Seite bestimmt der Konstrukteur als ausführendes Organ die Gestalt, Qualität und letztendlich auch die Kosten. Durch seine – meist von Erfahrung geprägte – Tätigkeit ist er maßgeblich an der Durchführung und dem positiven Gelingen bei der Produktentwicklung beteiligt, sieht sich aber häufig im Wechselspiel zwischen funktionalen Forderungen, Designkriterien, zusätzlichen Funktionen, räumlichen Vorstellungsvermögen und dem Kunden. Dieses Wechselspiel resultiert letztendlich auch daraus, dass er versucht, das beste Ergebnis aus seiner Sicht zu erzielen, der Kunde dies aber nicht einschätzen kann und erst nach den ersten Entwürfen in der Lage ist, seine Vorstellungen zu konkretisieren \1\). Auch sieht sich der Konstrukteur mit einer ständig wachsenden Bedeutung von Industriedesign konfrontiert, denn der Endkunde (Käu-

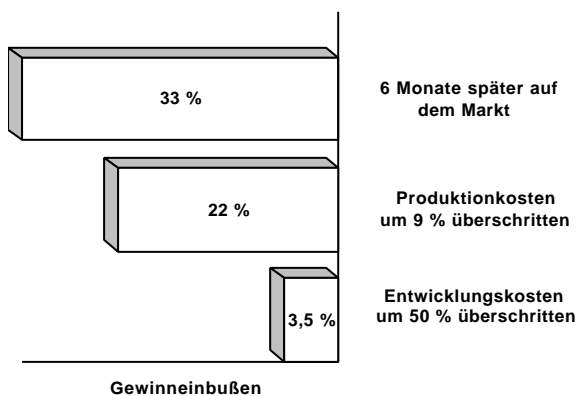


fer) wählt sein Produkt auch - und besonders - nach optischen Gesichtspunkten. Durch die Entwicklungen am Markt gewinnen des weiteren die Schnelligkeit, Individualisierung der Produkte, kurze Produktlebenszeiten, der Einfluss von Vorschriften und Normen, etc. an Bedeutung.

Im Rahmen der Tendenz, die Entwicklung von Produkten zu beschleunigen und sie zu verbessern, den Anforderungen des Marktes zu genügen, den beteiligten Partnern einen optischen und haptischen Eindruck zu verschaffen und die Realisierung zu erleichtern, haben sich in den vergangenen Jahren Veränderungen bei der Produktentwicklung eingestellt, die einem Produkt zu einem größeren Markterfolg verhelfen können. Hierzu zählen unter anderem 3D-CAD Systeme und die Einführung des Rapid Prototyping. Mit dieser neuen Technik kann das Manko der Anschaulichkeit der Konstruktion behoben und eine Steigerung der Kommunikation zwischen den beteiligten Partnern und Abteilungen erreicht werden, da quasi über Nacht Ideen in ein körperliches Bauteile umgesetzt werden können.

### 3 Die Bedeutung der Zeit und der Kosten für die Produktentwicklung

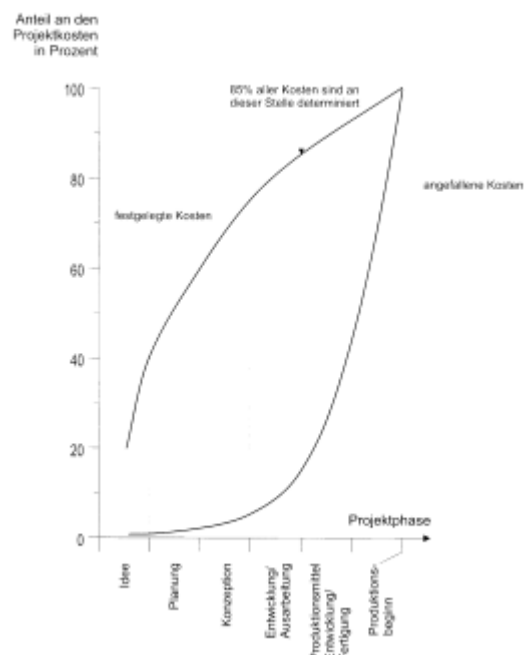
Als Schlüsselfaktor für den Erfolg eines Produktes - und somit letztlich auch für den Erfolg eines Unternehmens - gewinnt der Zeitpunkt der Markteinführung eines Produktes, die sogenannte „time-to-market“, zunehmend an Bedeutung. Eine Studie von McKinsey [2] nach **Bild 1** hat ergeben, dass nicht die Entwicklungskosten, sondern die Zeit der entscheidende Faktor ist, denn die frühe Markteinführung wirkt sich deutlich positiver auf die Gesamtkosten aus, als eine Erhöhung der Entwicklungskosten schadet.



**Bild 1:** Gewinneinbußen in Abhängigkeit von Markteinführung, Produktions- und Entwicklungskosten. /2/

Im Detail heißt dies, dass eine um 6 Monate verspätete Markteinführung Gewinneinbußen von 33% bedeutet, hingegen eine Verdoppelung der Entwicklungskosten lediglich zu einer 3,5% Gewinneinbuße führt. Die Aussage, dass ein 9%iges Überschreiten der geplanten Produktionskosten zu Gewinneinbußen von 22% führt, unterstreicht die besondere Bedeutung der Entwicklung, die ihrerseits nur einen geringen Anteil an den möglichen Gewinneinbußen hat. In Ergänzung dazu zeigt **Bild 2** den Einfluss und die Verantwortung des Konstrukteurs auf die Kosten, denn es ergibt sich, dass mit Abschluss der Entwicklung bereits 85% aller Kosten festgelegt sind. Da aber zu diesem Zeitpunkt erst 20% der Projektkosten angefallen sind, bestätigt sich der untergeordnete Anteil an den Gesamtkosten und die entscheidende Beeinflussung dieser.

Betrachtet man ergänzend die Kosten in Abhängigkeit zur Projektphase, die für eine bestimmte, gleichartige Änderung entstehen, so steigen die Kosten exponentiell mit Voranschreiten der Produktentwicklung an. Eine Änderungen ist nicht nur zeitraubend, sondern kann sogar im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium existenzgefährdende Kosten verursachen.



**Bild 2:** Projektkosten in Abhängigkeit von der Projektphase /2/

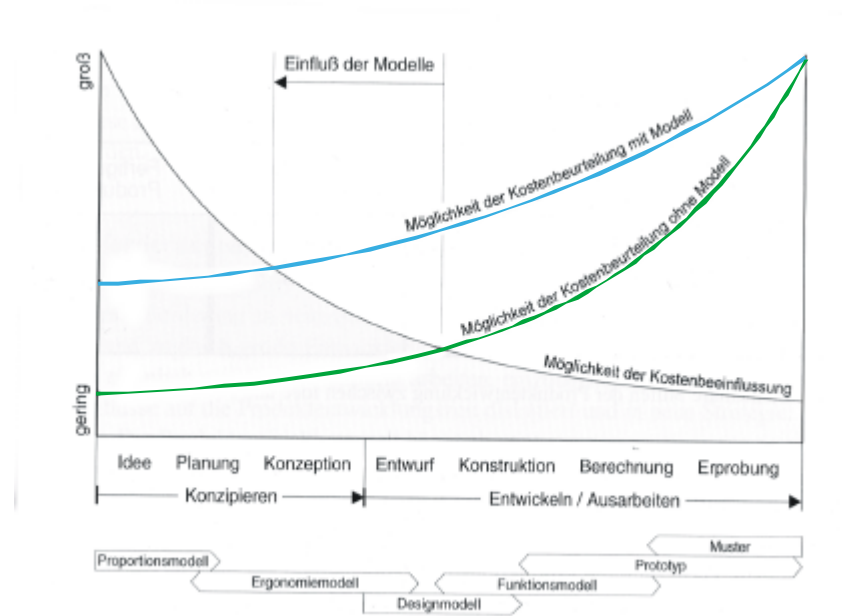
Damit lässt sich zusammenfassen, dass der Produktentwicklung eine besondere Beachtung verdient, denn sie

- definiert die Produktionskosten,
- definiert die Entwicklungskosten und
- definiert die Markteinführung.

#### 4 Modelle in der Produktentwicklung

Ein effizientes Hilfsmittel, das die Produktentwicklung unterstützt, für eine bessere Kommunikation zwischen den Auftraggebern und den Auftragnehmern sorgt, einen Teil der Fehlermöglichkeiten bereits im frühen Entwicklungsstadium begrenzt, vermeidbare Kosten verhindert und die Zeit bis zur Markteinführung deutlich verkürzt, ist der Einsatz von Modellen in den Entwicklungsteams.

Gerade während der letzten Jahre haben die Entwicklungen zu einem deutlich breiteren Einsatzspektrum der RP Verfahren geführt. Angefangen von der Stereolithographie sind nun Systeme auf dem Markt, die zu vertretbar geringen Kosten quasi über Nacht Modelle erstellen. Diese finden mittlerweile in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses ihre Anwendung und gewinnen als Anschauungsmuster an Bedeutung. Wie **Bild 3** zeigt,



**Bild 3:** Modelle in der Produktentwicklung /2/

finden sich in allen Bereichen, angefangen bei einem Proportionsmodell in der Konzeptphase und am Ende der Kette als Muster in der Erprobungsphase Einsatzmöglichkeiten von Rapid Prototyping Bauteilen. Es ist schnell ersichtlich, dass der Einsatz von Modellen durch die Kostenbeeinflussung und deren Beurteilung bestimmt ist. Es zeigt sich, dass durch den Einsatz von Modellen in einem frühen Stadium des Produktentstehungsprozesses ein großer Einfluss auf die später anfallenden Kosten genommen werden kann, was bei der Vorgehensweise nach „target-costs“ erhebliche Vorteile bringt.

Im weiteren Verlauf gewinnt die exakte Voraussage der Kosten auch eine deutliche Einflussnahme mit sich, was direkt zu einer Kostenreduzierung führen kann. Somit kann hier erfolgreich das Ziel verfolgt werden, durch eine gesteigerte Anschaulichkeit und Qualität der Kommunikation zwischen den Partnern, frühzeitig Fehler zu erkennen und eine damit deutliche Zeitersparnis zu erreichen.

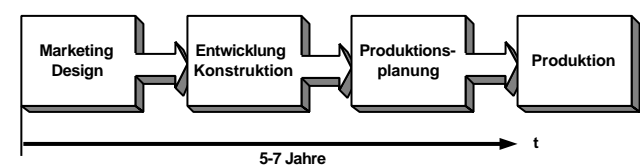
#### 5 Die Bedeutung von Rapid Prototyping für den Produktentwicklungsprozess

Um Modelle in den verschiedenen Phasen der Produktentwicklung einzusetzen und damit die Vorteile der neuen Techniken nutzen zu können, bedarf es eines breiten Wissens um die verschiedenen Verfahren und deren Einsatzmöglichkeiten. Durch die große Anzahl der verschiedenen Verfahren gibt es unterschiedliche Prototypen, die zum Beispiel nur

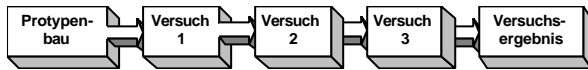
als Anschauungsobjekt dienen, aber auch deutlich hochwertige Bauteile, die in ihren Eigenschaften und Genauigkeiten die späteren Serienbauteilen kaum nachstehen. Betrachtet man den klassischen Produktentwicklungsprozess so zeigt sich nach **Bild 4**, dass auf dem Weg von der ersten Phase bis zum Produktionsstart zwischen 5 und 7 Jahre vergehen können, denn jede Instanz übergibt ihre Ergebnisse erst nach Abschluss der Arbeiten an die folgende.

Dieses Vorgehen und der Einsatz von Prototypen in **Bild 5** führt zwangsläufig zu langen Produktentwicklungszeiten. Gerade

das Vorgehen von Prototypenbau über Versuche führt zu einer erheblichen zeitlichen Verzögerung und zu Fehlern, denn meist ist die Produktentwicklung den Versuchen voraus, so dass die Prototypen, die in die Versuchsstände eingebaut sind, nicht mehr aktuell sind.



**Bild 4:** Der Weg vom Design zur Produktion

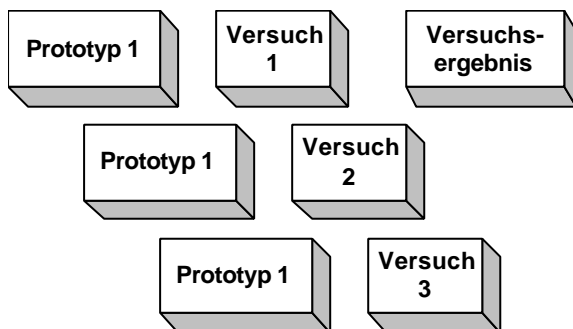


**Bild 5:** Produktentwicklung ohne RP Technologien

Die Gesamtversuchsauswertung am Ende der Versuchsreihe ist dann verständlicherweise nicht immer mit dem aktuellen Datenstand vergleichbar, so dass erst nach Abschluss der Auswertungen ein neuer Prototyp in Auftrag gegeben werden kann und die Vorgehensweise beginnt erneut.

Um Abhilfe zu schaffen, haben sich im Laufe der letzten Jahre Vorgehensweisen unter dem Stichwort „Simultaneous Engineering“ entwickelt, die jetzt in der Produktentwicklung mit Hilfe des Rapid Prototyping eine erweiterte Anwendung finden.

Scheiterte die Vorgehensweise nach Bild 5 vornehmlich daran, dass die Herstellung von Mustern und Prototypen zeitaufwendig und kostenintensiv war, so kann der zwangsläufig entstehende Bedarf mittels der neuen Techniken befriedigt werden. Wie **Bild 6** zeigt, kann eine deutliche Zeitersparnis bei Einsatz von 3 - dem jeweiligen Produktstatus angepassten - Prototypen erreicht werden. Der technologische Vorsprung lässt sich leicht ableiten, wenn er auch nicht generell verifizierbar ist.



**Bild 6:** Versuchsaufbau mit RP Techniken

Bei dieser Vorgehensweise zeigt sich aber ein Nachteil der RP-Verfahren, denn durch die schichtweise Herstellung von Bauteilen entsprechen diese nicht in allen Fällen die Eigenschaften des späteren Serienproduktes, so dass die Versuche mit reinen Prototypen nicht immer repräsentativ sind. Ein weiterer Nachteil ist darin zu sehen, dass mittels RP hergestellter Prototypen meist nur ein einzelnes Bauteil hergestellt wird, aber häufig für Versuche mehrere Exemplare benötigt werden.

Abhilfe schaffen hier Vervielfältigungsverfahren wie das Silikonabgussverfahren oder das Rapid Tooling, bei dem keine „Positiv-Prototypen“ gebaut werden, sondern metallische Negativ-Formen, mit deren Hilfe im Spritzgussverfahren eine große An-

zahl von Bauteilen (in der Regel mehrere 100) im späteren Serienwerkstoff hergestellt werden können.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der RP Verfahren können bereits in den frühen Phasen des Produktlebenszyklus schnell und unkompliziert Varianten geschaffen werden, die auch komplexe Zusammenhänge problemlos und präzise wiedergeben, die als Diskussionsgrundlage zwischen Konstrukteur und Auftraggeber dienen können. Im weiteren Verlauf können über Wahl eines geeigneten „Vervielfältigungsverfahrens“ die Teile als Muster zum Beispiel für Funktionstests eingesetzt werden. Durch die schnelle Herstellung von Prototypen kann ein erheblicher Schritt in Richtung Zuverlässigkeit getan werden.

Nach Abschluss der Konstruktionsphase können diese Bauteile auch als Vorserienteile ihren Einsatz finden, die durchaus in der Produktionsplanung zu erheblichen Vorteilen führen können.

In Kombination mit dem Vorgehen nach „Simultaneous Engineering“ lassen sich in allen Phase der Produktentwicklung Vorteile hinsichtlich Qualität, Zeit und Kosten erreichen.

Auf Unternehmensebene lässt sich durch dieses Vorgehen eine deutliche Verbesserung der Marktposition und eine Erhöhung des Technologieumschlags erreichen. Dies bedeutet, dass Produkte auf den Markt gebracht werden können, die veränderte oder sogar neue Eigenschaften aufweisen, für die die Konkurrenz mit herkömmlichen Methoden eine erheblich längeren Zeitraum benötigt.

Ein für den Kunden deutlich messbarer Vorteil besteht durch die Rapid Prototyping Technologien darin, dass auf seine Anforderungen und Wünsche schneller eingegangen werden. Als Konsequenz hat dies zur Folge, dass ein Wechsel von Verkäufer- zu Käufermarkt eine mögliche Konsequenz der Technologie sein kann, denn durch das Wissen und die Anwendung der Möglichkeiten steigen auch die Marktchancen des Auftragnehmers.

## 7 Literatur

- /1/ Kruse, Peter: Dissertation: Anforderungen in der Systementwicklung, VDI Reihe 20 Nr. 191, 1996, ISBN 3-18-319120-2
- /2/ Gebhardt, Andreas: Rapid Prototyping, Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung, Hanser Verlag München, Wien, 1996, ISBN 3-446-18240-3

# Ein modularer Prozeß als Grundlage eines wissensbasierten Systems im Anforderungswesen

Heimannsfeld, K.; Pawar K.<sup>1</sup>; Ratchev S.<sup>1</sup>; Struck T.<sup>1</sup>

*Das EU ESPRIT Projekt 28916 KARE (Knowledge Acquisition and Sharing for Requirements Engineering) entwickelt eine auf Unternehmenswissen basierte Umgebung zur Unterstützung des Auffindens, der Analyse und des Management von Anforderungen. Der folgende Artikel untersucht bestehende Prozeßmodelle und beschreibt den in KARE entwickelten Anforderungsprozeß (KARE Methodology).*

*The EU ESPRIT project 28916 KARE (Knowledge Acquisition and sharing for Requirements Engineering) develops an enterprise knowledge based framework and workbench to support requirements engineering. The following article describes the requirements process (KARE methodology) developed in KARE.*

## 1 System- und Produktentwicklung

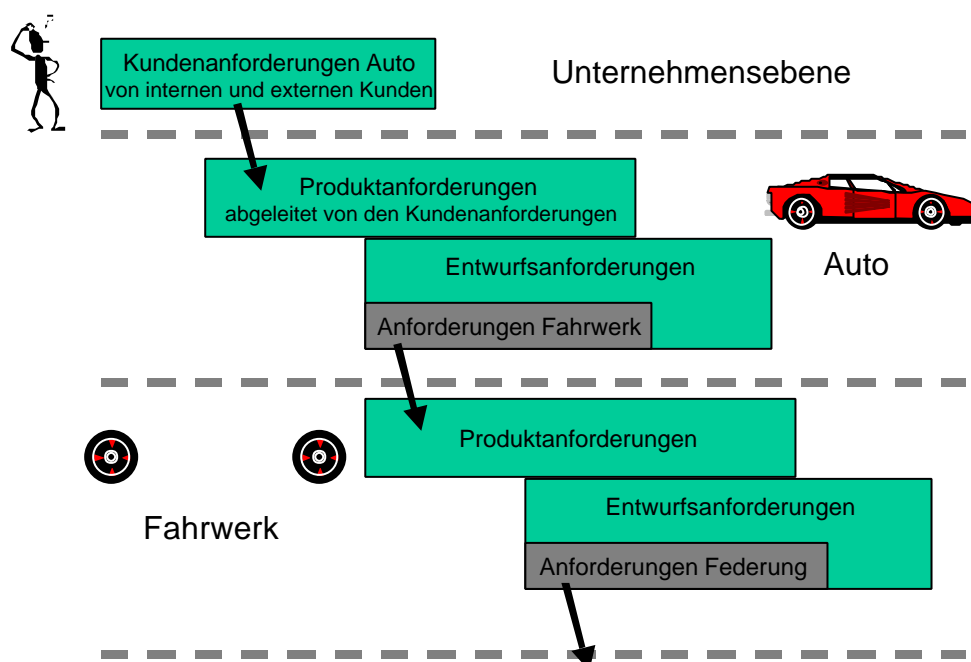
Die Ursprünge des KARE Projektes liegen in der Entwicklung von komplexen Systemen wie sie sich z.B. in der Luft- und Raumfahrt finden. Entwicklungszeiten dieser Systeme liegen teilweise bei bis zu 10 Jahren. Im Maschinenbau und der Konstruktionslehre [3,4,5] werden Produkte mit meist deut-

lich kürzeren Entwicklungszeiten betrachtet. Die Hauptunterschiede zwischen den Begriffen System und Produkt ist oftmals schwer auszumachen. Systeme sind normalerweise der Überbegriff und beinhalten nicht nur materielle Elemente, sondern auch Dienstleistungen. Da der Umfang eines Systems aber grundsätzlich relativ zu den übergeordneten Systemen oder den Untersystemen ist kann eine klare Unterscheidung zwischen System und Produkt nicht vorgenommen werden. Im folgenden werden wir den Begriff Produkt benutzen, da er dem natürlichen Sprachgebrauch des Maschinenbauers entspricht.

Bevor wir mit der Betrachtung des Anforderungsprozesses beginnen, sollten wir noch einmal kurz die Definition des Begriffes Anforderung betrachten.

Im Maschinenbau und den Disziplinen des System- und Software Engineering werden grundsätzlich zwei Klassen von Anforderungen unterschieden: Funktionale Anforderungen (Hauptfunktionen) und nicht funktionale Anforderungen.

Im allgemeinen Sprachgebrauch bei der Formulierung von Anforderungen werden beide Typen oftmals vermischt. „Das Fahrzeug soll mit einer mini-



**Bild 1:** Relative Sicht auf Produkte und zugehörige Anforderungen

malen Geschwindigkeit von 100 km/h fahren“. Die funktionale Anforderung wird indirekt durch das Verb „fahren“ beschrieben, während die Geschwindigkeit durch eine nicht funktionale Leistungsanforderung repräsentiert wird.

**Bild 1** beschreibt die relative Sicht des Produktes „Auto“ und den zu geordneten verschiedenen Anforderungsebenen.

Der Kunde (extern oder intern z.B. Marketingabteilung) definiert die „Kundenanforderungen“, die von der Entwicklungsabteilung in eine möglichst konsistente und eindeutige Anforderungsliste überführt wird. Diese Kundenanforderungen sind die Basis für alle weiteren Entwicklungen und die spätere Abnahme oder Verifikation des Produktes. Der Konstrukteur legt durch seine Entscheidungen die Entwurfsanforderungen fest. In den Entwurfsanforderungen sind wiederum „Kundenanforderungen“ an die Unterkomponenten und Untersysteme fest. Der Übergang zwischen Entwurfsanforderungen und Spezifikation der Produktmerkmale ist dabei fließend.

Der, in diesem Artikel beschriebene Anforderungsprozeß bezieht sich auf die Verarbeitung von Kunden- und Produktanforderungen. Entwurfsanforderungen, wie sie beim Konstruieren festgelegt werden, sind nicht direkt Gegenstand dieses Prozesses. Die systematische Behandlung von Entwurfsanforderung wird z.B. in /1/ und /2/ beschrieben.

## 2 Sichten auf Anforderungen

Um die Komplexität des KARE Projektes zu reduzieren wurden verschiedene Sichten auf unterschiedliche Teilbereiche definiert. Die Sichten und die Zusammenhänge auf konzeptioneller Ebene sind im KARE Referenzmodell definiert.

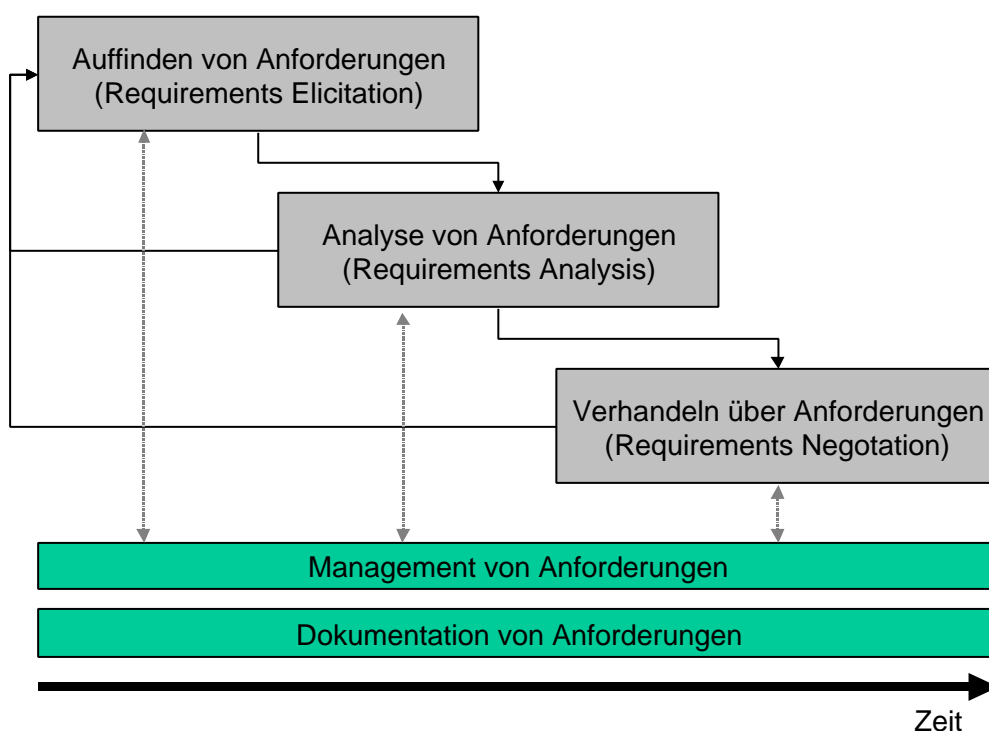
Das Referenzmodell ist in drei Hauptsichten gegliedert:

- Prozeß
- Objekt- und Informationsmodell
- Softwarearchitektur & Schnittstellen

Diese Sichten spiegeln sich auch in den meisten modernen Entwicklungsmethodiken (OMT, UML) wieder. Das Informationsmodell definiert Objekte wie z.B. Anforderungen, Produkte und Eigenschaften von Produkten. In KARE werden im Moment ein detailliertes Anforderungsmodell sowie ein Informationsmodell für Unternehmenswissen entwickelt.

Die KARE Architektur beschreibt die einzelnen Komponenten und Schnittstellen der Softwarewerkzeuge, die derzeit im Rahmen von KARE entwickelt werden.

Die Prozeßsicht beschreibt den Informationsfluß und die Aktivitäten, die notwendig sind, um die in KARE definierten Ziele zu erreichen. Gemäß den zwei Hauptzielen, die Unterstützung der Kunden zu Hersteller Kommunikation und die Wissensunterstützung des Anforderungsprozesses, wurde zwei



**Bild 2:** Hauptelemente des Anforderungsprozesses

Sichten auf den Anforderungsprozeß definiert. Die erste Sicht beschreibt die Interaktion zwischen Kunden und Hersteller in der Systementwicklung.

Die zweite Sicht auf den Anforderungsprozeß beschreibt den eigentlichen Kernprozeß zur wissensbasierten Unterstützung. Im folgenden wollen wir die wesentlichen Details dieses „Kernprozesses“ beschreiben.

Neben diesen zwei Sichten existieren natürlich noch weitere Sichten auf den Anforderungsprozeß wie z.B. der Managementprozeß von Anforderungen.

### 3 Anforderungsprozeßmodelle

In einer Vielzahl von Veröffentlichungen, Büchern und Standards wird das Thema behandelt wie man am besten zu einer qualitative hochwertigen Anforderungsliste kommt. Schaut man allerdings genauer, so stellt man schnell fest, daß die wenigsten Prozeßbeschreibungen detailliert und formal spezifiziert sind /8/.

Die meisten Veröffentlichungen sind sich jedoch in diesem globalen Bild des Prozesses einig. **Bild 2** zeigt die 3 Hauptaktivitäten des Anforderungsprozesses.

Anforderungen an ein Produkt müssen aus den Gegebenheiten des Marktes, der Geschäftsstrategie und den Kundenwünschen abgeleitet werden. Die erste Phase des Anforderungsprozesses beschreibt wie Anforderungen systematisch erarbeitet werden können (siehe auch /9/). Im Englischen wird diese Phase als Requirements Elicitation bezeichnet.

Die zweite Phase analysiert die Anforderungen in Hinsicht auf Konsistenz, Eindeutigkeit, Vollständigkeit der Anforderungen und führt die Validierung

und Wertanalyse (Trade-off) durch. Einige Modelle beschreiben die Validierung ( Brauchen wir diese Anforderung und ist die Anforderung eindeutig formuliert ?) der Anforderungen als separate Phase /7/.

Die dritte Phase beschreibt wie Probleme in der Anforderungsdefinition zwischen Kunden und dem Produktentwickler gelöst werden.

Neben diesen drei Phasen müssen Anforderungen verwaltet und dokumentiert werden.

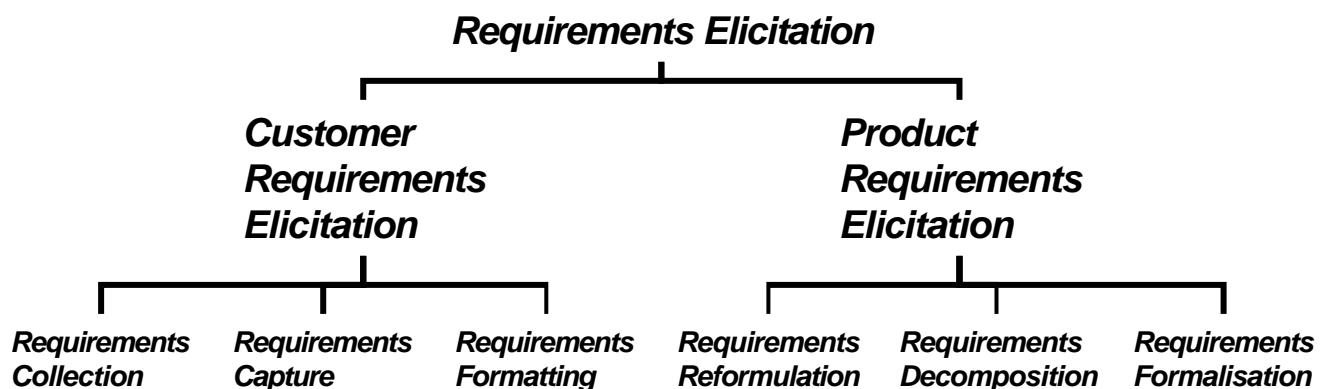
Diese Prozesse sollten nicht als streng sequentiell betrachtet werden. In der Realität sind alle Phasen eng verzahnt und laufen teilweise parallel.

In /8/ wird ein Prozeßmodell aus Sicht des Knowledge Engineerings mit Hilfe der DESIRE Entwicklungsmethode formal spezifiziert. Als Besonderheit dieses Ansatzes wird in einer vierten Phase die Kontrolle der anderen drei Prozesse explizit gemacht. Im Vergleich zu anderen gängigen Prozeßbeschreibungen unterstützt /8/ allerdings auch die Beschreibung der Anforderungen als Szenarien (Use Cases). Durch die Benutzung der Szenarien wird die Definition des Systemverhaltens konsequent und explizit beschrieben.

Eine gute und detaillierte Beschreibung des Anforderungsprozesses findet man auch in /12/.

### 4 Der KARE Anforderungsprozeß

Die Entwicklung eines semi-formal beschriebenen Anforderungsprozesses in SADT diene im wesentlichen zur Verdeutlichung und Festlegung der Informationsflüsse zwischen den einzelnen Prozeßaktivitäten. Die Informationsflüsse beinhalten die verarbeiteten Systementwurfsdaten sowie die zur Unterstützung notwendigen Steuerinformationen aus den Wissenskomponenten. Die Definition des



**Bild 3:** Überblick des KARE Requirements Elicitation Prozesses

Prozesses erfolgte in SADT. In **Bild 3** und **Bild 4** werden die hierarchische Dekomposition der zwei Hauptprozesse Requirements Elicitation (Auffinden und Generieren von Anforderungen) und Requirements Analysis (Analyse von Anforderungen) dargestellt. Die zeitliche Ausführung der Teilprozesse (gleichzeitig, sequentiell, alternativ) ist nicht implizit in SADT modelliert. Generell wird der Prozeß auf der linken Seite in **Bild 3** anfangen und mit der rechten Seite von **Bild 4** enden. In der industriellen Praxis sind dies aber häufig kognitiv komplexe Konstruktions- und Entwurfsprozesse, die teilweise parallel und mit häufigen Iterationen durchgeführt werden. **Bild 5** zeigt die Verknüpfung des Anforderungsprozesses mit dem Prozeß zur Wissensakquisition und Wissensunterstützung.

#### 4.1 Das Auffinden von Anforderungen

Requirements Elicitation beschreibt die Tätigkeiten um im Idealfall alle Anforderungen an ein Produkt zu definieren. Eine initiale Menge von Anforderungen kommt von externen Kunden oder internen Quellen wie Marketing und Verkauf. Diese initiale Menge wird oftmals als Kundenanforderungen bezeichnet. Diese Menge ist aber oftmals unvollständig, inkonsistent und mit anderen Fehlern behaftet. Im Extremfall liegen überhaupt keine Anforderungen vor.

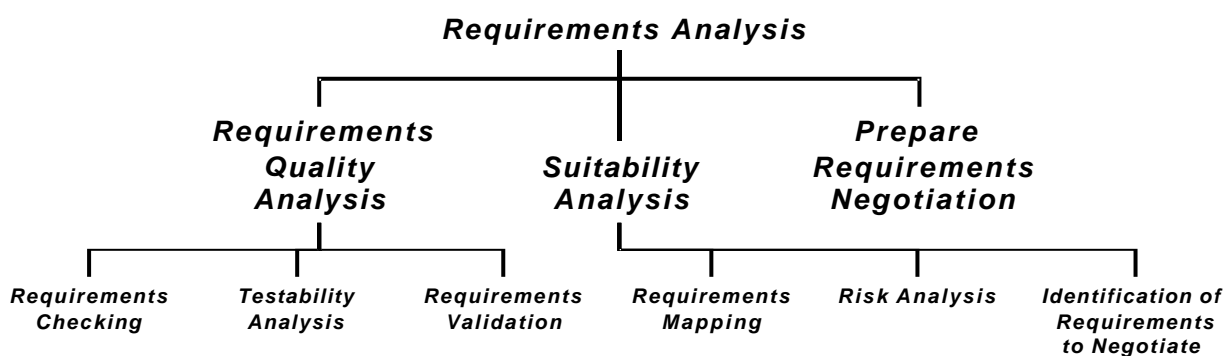
Aufgabe der Requirements Elicitation (siehe **Bild 3**) ist es die Anforderungen aller am Produkt beteilig-

Maschine Schnittstellen werden oftmals Videoobservationen erstellt um implizite Anforderungen der Benutzer zu finden. In /9,10,11/ werden übliche Methoden beschrieben, wie sie im Maschenbau oder dem Systementwurf Anwendung finden.

Da diese Methoden disziplin- und problemabhängig sind, wurde in KARE lediglich ein Rahmen für die Integration verschiedener Methoden geschaffen.

Requirements Elicitation in KARE besteht aus zwei Unterprozessen. Der erste Prozeß, Customer Requirements Elicitation, sammelt alle Kundenanforderungen und dokumentiert sie in einer Datenbank. Das Format der gespeicherten Anforderungen kann dabei verschiedene Formalisierungsebenen haben. In der Regel werden die Anforderungen in textueller Form vorliegen und erfaßt werden. Um die Anforderungen in ein interpretierbares Modell zu überführen, werden sie mit Hilfe von drei Schritten formalisiert. Dazu werden zuerst Wörter identifiziert die nicht verifizierbar sind (möglichst, vielleicht ...). Im zweiten Schritt werden die Bedeutung der Objekte und Verben in dem Anforderungstext mit Hilfe eines Thesaurus definiert. Als letzter Schritt wird der Anforderungstext optional in ein benutzerdefiniertes Formular eingefügt.

Zur Art der Definition und Formalisierung von Anforderungen gibt es unterschiedliche Auffassungen. In /12/ wird starker Wert auf die modellbasierte Erfassung von Anforderungen gelegt, die der Autor dieses Artikels auch teilt. Leider erfordert die indu-



**Bild 4:** KARE Prozeßhierarchie bei der Analyse von Anforderungen

ten Personen systematisch aufzufinden, zu ordnen und zu dokumentieren. Dieser Personenkreis sollte alle Personen einschließen, die im Laufe der Produktlebensphasen in Kontakt mit dem Produkt kommen.

In Abhängigkeit des Problembereiches werden verschiedene Verfahren eingesetzt. In Bereich der Informatik und insbesondere im Bereich der Mensch-

strielle Anwendung immer noch die textbasierte Vorgehensweise. KARE unterstützt deswegen die Formalisierung von Anforderungen auf textueller, semi-formaler und formaler Ebene.

Im zweiten Unterprozeß, Product Requirements Elicitation, werden die Kundenanforderungen in Hinsicht auf Komplexität, Redundanz und Eindeutigkeit untersucht. Wird eine Anforderung als zu

komplex bewertet, so wird sie in Teilanforderungen dekomponiert (Requirements Decomposition). Sobald eine Anforderung die erste Qualitätsbewertung durchlaufen hat, wird sie mit Hilfe von Eigenschaften (für nicht funktionale Anforderungen) und mit Funktionsnamen (für funktionelle Anforderungen) in eine formale Modellbeschreibung überführt. Könnte die Anforderung nicht mit Hilfe dieser Vorgehensweise formalisiert werden, so muß die Anforderung reformuliert werden und durchläuft den Prozeß erneut.

Diese formale Definition von Anforderungen bildet die Grundlage für die Analyse der Anforderungen, die in der nächsten Phase stattfindet. **Bild 5** zeigt das SADT Modell des Product Requirements Prozeß

#### 4.2 Analyse von Anforderungen

Der Anforderungsanalyseprozeß besteht im wesentlichen aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden die Anforderungen und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten untersucht und analysiert. Ziel der Analyse ist es, Inkonsistenzen und Redundanzen aufzufinden, die Testbarkeit (Festlegung der Verifikation) einer Anforderung zu spezifizieren und zu überprüfen, ob eine Anforderung den Kundenwunsch korrekt wiedergibt (Validierung).

Inkonsistenzen in einer Menge von Anforderungen ergeben sich insbesondere dann, wenn nicht-

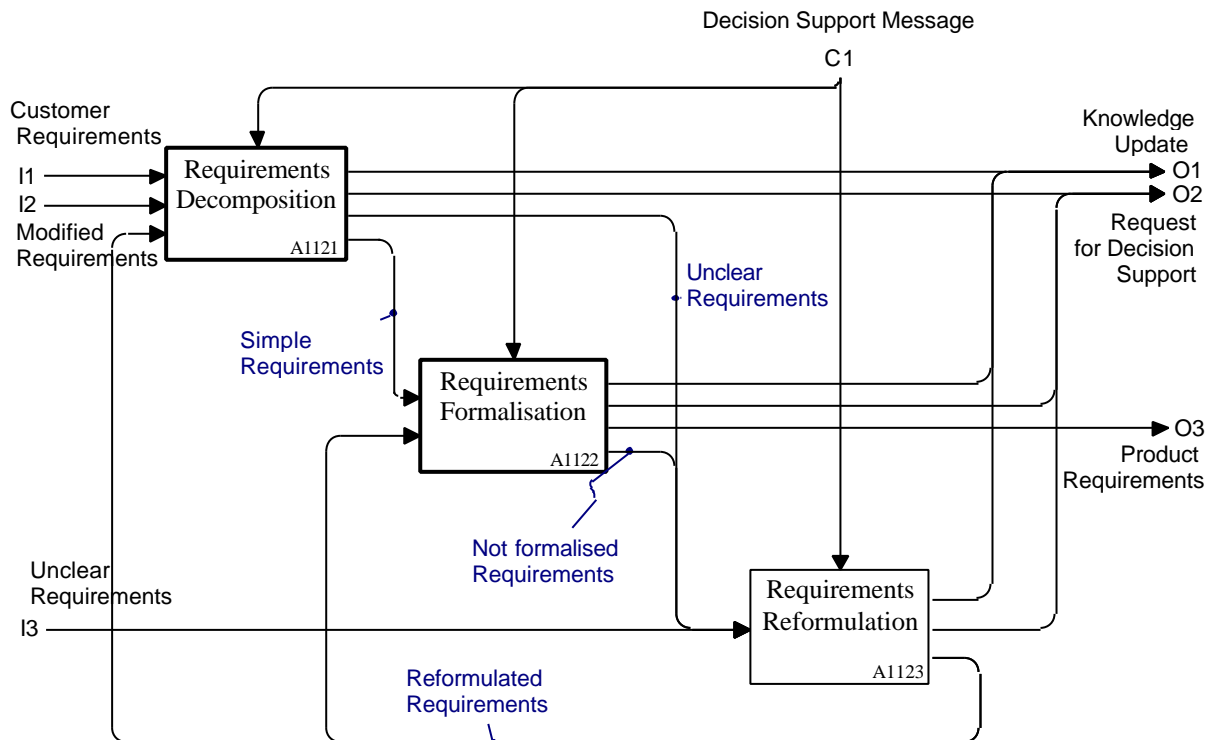
funktionale Anforderungen über Naturgesetze in Verbindung stehen (z.B. Abhängigkeiten in Entwurfsparametern). Die Wissenskomponente von KARE versucht diese Abhängigkeit, soweit sie bekannt sind, einzufangen und auszuwerten.

Die Möglichkeit die Erfüllung einer Anforderung nachzuweisen spielt eine wichtige Rolle. Kann keine Methode für die Verifikation (Ist die Anforderung im Produkt erfüllt ?) einer Anforderung festgelegt werden, so muß die Anforderung umgeschrieben werden.

Die Validierung (Ist die Anforderung korrekt ?) stellt sicher, daß die Anforderung wirklich benötigt wird und den Wunsch des Kunden wiedergibt.

Der zweite Teil (Suitability Analysis) beschreibt die Wertanalyse der Anforderungsliste in Bezug auf ein vorher festgelegtes Optimierungsziel. Typische Optimierungsziele sind Kosten, Verfügbarkeit, Sicherheit, Risikoabschätzungen und Wiederverwendbarkeit von vorhandenen Produkten oder Komponenten.

Dazu wird zuerst versucht auf Basis der definierten Anforderungen eine Lösung aus bereits bestehenden Komponenten und Produkten zu synthetisieren. Mit Hilfe dieser Lösung kann dann unter Verwendung bestehender Erfahrungen Kosten, Risiken und andere Bewertungskriterien abgeschätzt werden. Als hilfreiches Nebenprodukt dieses Abbil-



**Bild 5:** SADT Modell für den Product Requirements Elicitation Process



dungsprozesses können fehlende und überflüssige Anforderungen identifiziert werden.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Teilprozesse des KARE Anforderungsprozesses präsentiert.

Dabei wurde für das systematische Auffinden von Anforderungen ein Rahmen geschaffen, der von domänenspezifischen Methodiken erweitert werden kann.

Weitere und detaillierte Informationen zum dem in KARE entwickelten Referenzmodell, dem Anforderungsprozeß, dem Anforderungsinformationsmodell und der Wissensunterstützung können auf der KARE Website <http://www.kare.org> gefunden werden.

Auf Grundlage des Anforderungswerkzeuges *demanda* /12/ werden die bisher erzielten Ergebnisse in Form eines Softwareprototypen derzeit implementiert und getestet.

## 6 Literatur

- /1/ Kruse, P.: Anforderungen in der Systementwicklung, Dissertation, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 20, Nr. 191, 1995
- /2/ Hartmann, D.: Modell zur qualitätsgerechten Konstruktion, Dissertation, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 1, Nr. 260, 1996
- /3/ Pahl, G.; Beitz W.: Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1993
- /4/ Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band I, Springer Verlag, Berlin, 1994
- /5/ N.N.: VDI 2221, Methodik zum Entwickeln und konstruieren technischer Systeme und Produkte, VDI Verlag, Düsseldorf, 1986
- /6/ Partsch, H.: Requirements Engineering systematisch, Modellbildung für Softwaregestützte Systeme, Springer Verlag, 1998
- /7/ Sommerville, I.; Kotonya G.: Requirements Engineering – Processes and Techniques, Wiley, 1997
- /8/ Damian, D.; Jonker, C.; Treur, J.; Wijngaards, N.: A formal knowledge level process model of requirements engineering, Proceedings Knowledge Acquisition Workshop Banff 1999, University of Calgary

<http://sehn.ucalgary.ca/KSI/KAW/KAW99/papers/Damien1/index.html>

- /9/ Gummersbach, F.; Heimannsfeld, K.: Anforderungen systematisch finden, Institutsmitteilungen Nr. 24, 1999, S.73-78
- /10/ Barbeau, S.: KARE functional requirements specification, Doc. KARE/AS/001, Aérospatiale Matra Lanceurs
- /11/ Oliver, D.; Kelliher, T.; Keegan, J.: Engineering Complex Systems with models and objects, McGraw-Hill, 1997
- /12/ Große, A.; Heimannsfeld, K.: Wissensbasierte Fehler- und Störfallanalyse bei der Entwicklung von verfahrenstechnischen Maschinen, Institutsmitteilungen Nr. 21, 1996, S. 73-80

---

<sup>1</sup> University of Nottingham, Department of Manufacturing Engineering

## Collaborative Product Development in a Distributed Engineering Environment

Goltz, M.

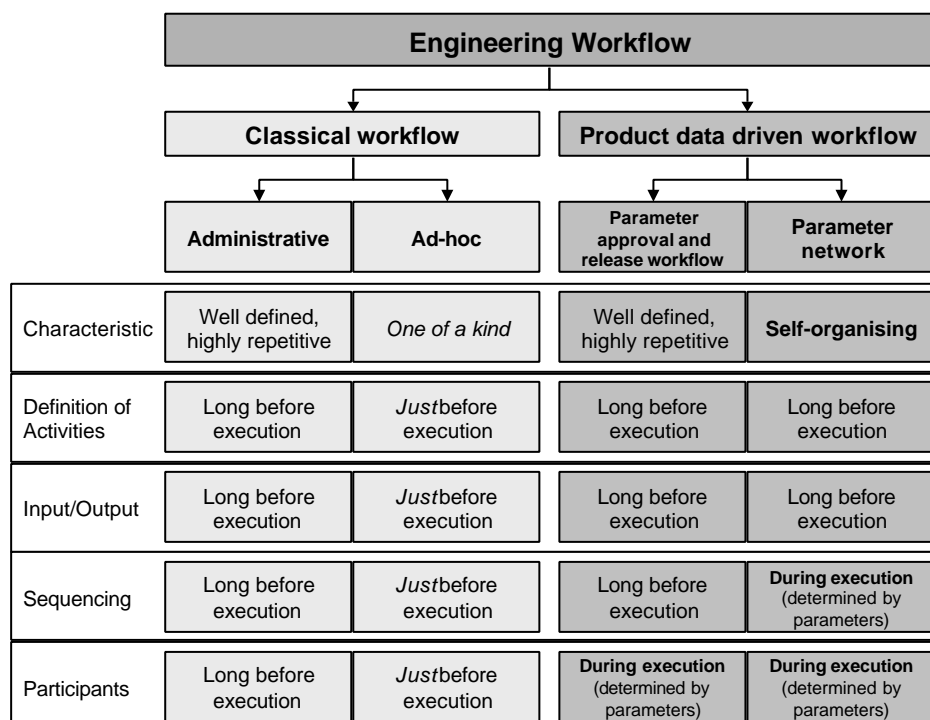
*Das Management einer unternehmensübergreifenden Produktentwicklung stellt erhöhte Anforderungen an die Kommunikation zwischen beteiligten Partnern und an die Transparenz der dafür notwendigen Daten. In diesem Artikel wird zum einen eine Lösung des Kommunikationsproblems in Form eines parameterbasierten Engineering Workflows vorgestellt. Zum anderen wird ein Konzept eines Collaborative Workspace dargestellt, welches eine sichere, webbasierte gemeinsame Datennutzung ermöglicht, sowie den Datenaustausch erleichtert.*

*This paper presents a concept to improve the management of collaborative product development in a distributed engineering environment. A product data driven workflow as a key enabler will be shown, that is able to manage engineering tasks across company borders. Furthermore, a concept for a secure web-based workspace will be given, that enables partners to share and exchange product data. This paper is based on the interim results of the European research project SIMNET – Workflow Management or Simultaneous Engineering Networks /1/.*

### 1 Collaborative Product Development Demands Better Access to Product Data

Only a small time share of engineering working hours can be considered 'productive'. Almost 25% are consumed while waiting for decisions or searching for information. In addition an overload of information has to be checked daily, such as notifications about proposed changes in products. The amount of information is increasing even more rapidly when working in a distributed environment where multiple partners have to work together on a complex product. Product modules not directly related to core competencies of a company are developed and delivered by suppliers and engineering partners using their know how and resources. Still time and budget is wasted because of work on outdated or obsolete information due to a lack of transparency and communication.

In order to shorten the time for development and to decrease the number of loops in the development process all partners have to work together from the early stages of product development. This leads to increased needs to exchange and share important



**Figure 1** Engineering Workflow – an Evolutionary Step beyond 'Classical' Workflow

and correct information among partners.

Today's product data management (PDM) systems provide powerful functionality regarding the management of complex product data. However, most often such systems are focusing on a single company-centric solution, not taking into account the variety of systems used at partner sites in the supply chain. One can easily imagine problems regarding the interoperability when starting to cooperate with partners.

Duplication of data on different sites or to a central data repository might be a solution. However, it does not overcome the problem sufficiently because still consistency of data can hardly be ensured. Furthermore, a solution supporting engineering activities across company borders is required, that facilitates the communication between the different partners.

## 2 Parameters – Key Enabler for Product Data Driven Engineering Workflows

Within the SIMNET project the workflow management functionality of a state of the art PDM system has been improved towards an engineering workflow system supporting the engineering cooperation within the supply chain. Within the context of SIMNET the following definition of an engineering workflow can be given (**Figure 1**):

*Engineering workflow consists of a combination of 'classical' and product data controlled workflow, where the 'classical' workflow reflects document based administrative and ad-hoc workflows (e.g. ECR/ECO<sup>1</sup> based engineering change procedures), while the parameter controlled workflow consists of parameter based approval and release procedures as well as activity routing by means of a parameter network. /2/*

Parameters describe attributes and properties of product components as well as relations between them along the life-cycle of a product. Three different categories of parameters can be determined:

- functional parameters (e.g. engine power),
- geometrical parameters (e.g. length of a shaft) and
- material related parameters (e.g. steel number).

The approach is based upon observing how engineers think about their tasks. Documents or procedures dedicated to product development are not their primary focus. They view their work as making engineering decisions. These decisions are reflected in determining or changing engineering variables – the parameters. Parameters represent the specific circumstances in a given engineering situation. Parameters often share complex relationships which can be represented in terms of equations, for example:

$$\text{Max\_axle\_diameter} = f(\text{maximum\_axle\_load}, \text{bear\_distance}, \text{track\_gauge}, \text{axle\_material})$$

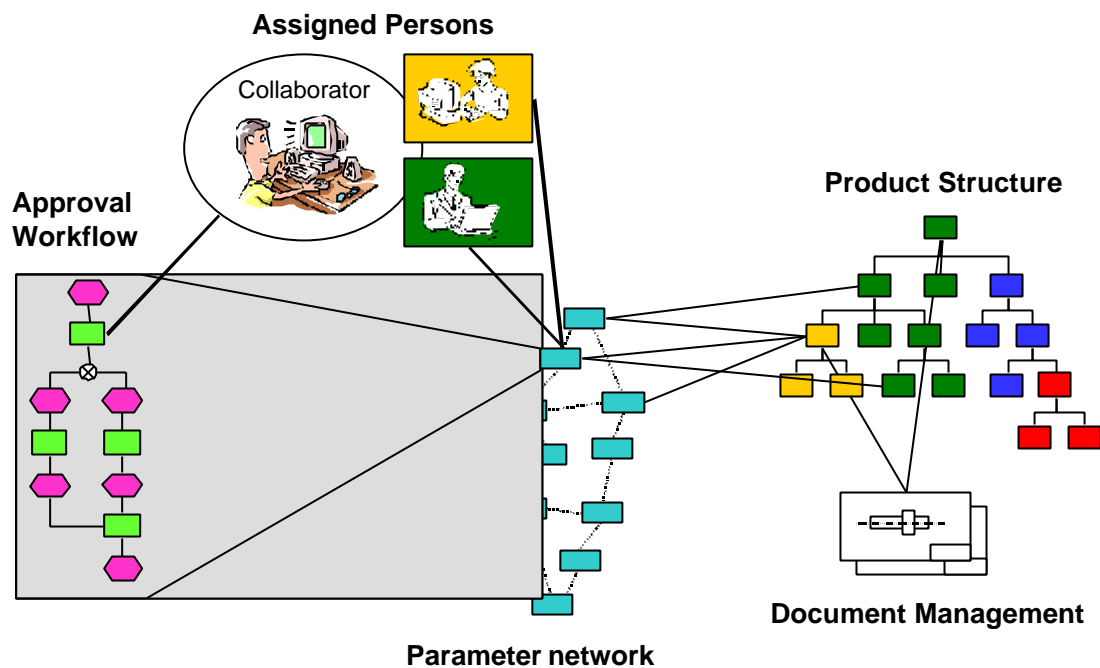
Due to the large amount of possible parameters needed to describe a product completely, it is vital to concentrate on the most important ones. Only a subset of parameters is required to enable a sufficient collaborative product development. Such subsets consist of system and interface parameters which have an impact on the work of more than one company of the supply chain. The core elements of the parameter management are:

- the definition giving the name and the physical unit on a project independent base to facilitate their reusability,
- the instance with the latest value, status and hardness grade for a given project,
- user categories that define the role of a stakeholder of a parameter, and
- an approval and release procedures enabling a sufficient communication between stakeholders of a parameter.

As different people in the supply chain decide on or use parameter values, capturing their interest on a parameter consequently specifies the relationship between the decision-making people and therewith the required interaction of a main contractor with his suppliers and engineering partners. In order to classify the different decision-making people a concept of five user category is used:

- Co-ordinator – technically responsible for a parameter,
- Collaborator – involved in the creation and elaboration of a parameter value, participates actively in the approval workflow,
- Reviewer – whose work is affected by a parameter value, participates in the approval workflow, but silent approval might be sufficient,

<sup>1</sup> ECR – Engineering Change Request, ECO – Engineering Change Order



**Figure 2** Integrating the Parameter Management into PDM Core Functions

- Subscriber – interested in a parameter, gets a notification only during approval workflows,
- Supervisor – responsible for a parameter from the organisational point of view, has to release a parameter depending on the status of the overall project.

On the other hand the user categories determine the participants of the approval and release workflow during its execution.

**Figure 2** illustrates the overall context of the parameter-based approach and its integration into the core functions of PDM systems. Starting point is the product structure with allocated documents that describe parts of the hierarchy from different views, such as a CAD drawing or a FEM model.

By capturing system and interface parameters and their linkage to affected components of a product structure indirect interdependencies between product components are revealed. The evolving parameter network furthermore indicates the relations between different parameters. Thus enables an easy detection of affected product components whenever a change request occurs.

People that have an interest in a parameter are assigned to it within a certain user category that meets their level of interest. This assignment may change from one parameter to another, for example an engineer designing the brake equipment for a train might be co-ordinator for the parameter 'hy-

draulic pressure' while at the same time he is a reviewer for the parameter 'maximum train speed'.

Furthermore, one approval and release workflow is applicable to all parameters. Participants of such workflow are determined by allocating the corresponding user category to the workflow tasks. Once the workflow is started for a given parameter the people assigned to that user category are determined as workflow participants for this parameter.

When introducing this approach an analysing phase is required to capture the most important parameters and to create the parameter definitions accordingly. Starting the implementation together with a pilot project enables engineers to create the parameter definitions and instantiate them simultaneously. The relations between the parameters are captured during the performance of the engineering activities.

Change requests are usually communicated in a parameter-based way. Examples are "The engine power needs to be increased" or "The shaft diameter is not sufficient". The parameter to be changed then automatically becomes the starting point for all further considerations.

As soon as a parameter is subject to a change, its current status is set to "in change". This is also true for the linked product structure items and related documents. Afterwards only those persons (or roles) are informed which are assigned to

- the changed parameter itself and

- all adjacent parameters (parameters which show a first-degree interdependence with the changed parameter).

The notification of the change is performed independent from the persons' company affiliation.

However, the system only highlights the existing relation and the possible change propagation between the changed and the neighbouring parameters in the network. The notified persons must jointly clarify whether "their" parameters are actually affected by the change. As long as this clarification is not completed, the neighbouring parameters remain in their current status.

As soon as it becomes clear that an adjacent parameter is affected by the change, its status is set to "in change" as well. In addition, the persons assigned to parameters with a second-degree relationship to the initially changed parameters via the affected one are notified.

The objective is to cope successfully with the change propagation through the product model by means of a step-by-step identification via the parameters and subsequent interaction of all people assigned to the (possibly) affected parameters. As soon as the change propagation is clarified to its full extent and a consensus between all people involved is reached, all parameters set to "in change" during the change process will be jointly set to "in approval" and finally approved as well as released within a single parameter-based approval and release workflow.

The approach described in the previous section has been implemented as a prototype into the PDM system axalant™ of EIGNER + PARTNER AG. The parameter management is deemed to be applicable to business fields that are dealing with small and large scale series and platform concept, such as automotive industry and tool manufacturing. The effort of capturing parameters and their relations won't pay back for one-of-a-kind products.

### 3 A Distributed Workspace to Enable Engineering Processes Across Companies

During the last years tremendous efforts have been spent to shorten the throughput time in production. Now these efforts are extended to the development stage of a product, which offers great potential to improve efficiency. Simultaneous engineering has been deployed in companies to overcome the time consuming sequential way of working. Experts from

other disciplines are integrated into a concurrent engineering design team. PDM and ERP systems providing workflow management capabilities support such teams by enabling the exchange of information. However, so far the IT support ends at the borders of each of the involved companies.

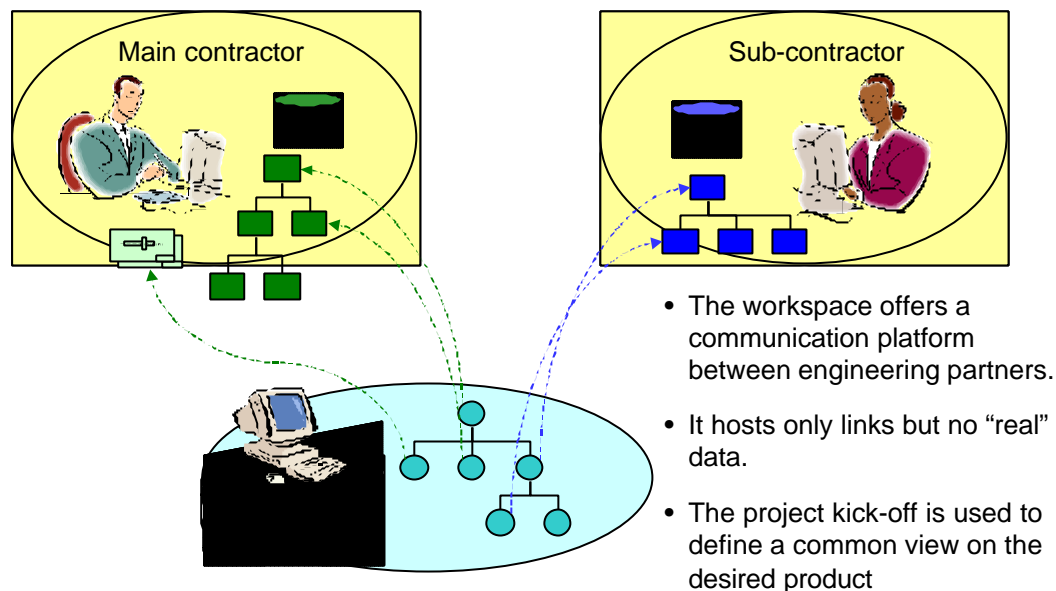
The presented parameter approach significantly improves the communication within the supply chain. It makes people aware of the consequences of changes and indicates who needs to be included into a discussion. However, so far it is a more process oriented solution. The available prototype can be used as stand alone application supporting the described engineering workflow. Partners without a PDM system and/or without parameter management could be included in the PDM system of the main contractor. Work requests are sent out to their mail boxes with all the required information in it. Approval or disapproval could be stated either by an 'accept' or 'reject' button within the email, that creates a reply automatically, or by including a hyperlink that leads to the web-interface of the PDM system where additional information can be retrieved.

However, such solution would only support the view of the main contractor of the supply chain. It does not support the linkage of partner information to the overall picture of the product, because it does not enable real information sharing.

#### 3.1 How to share information in a distributed environment?

Depending on their know-how partners are developing product components and modules on their own and within their local systems, only following the specification of the main contractor. In an ideal world the specification would be mature right from the beginning and the component delivered by the supplier fits perfectly into the final product. However, practice shows that this case never occurs. Changes to the specification are required from the main contractor side as well as from the suppliers side as the design evolves. Both partners need to share a common view on the information relevant to both of them.

Currently, there are two different ways to enable access to data that is used by different partners. The first way is to grant access to the host system of one of the partners. All other partners are forced to use the client of this specific PDM system or to stick to the web-interface which is most often e-



**Figure 3** The Distributed Workspace

duced in functionality. However, the number of required clients increases according to the number of different PDM systems used by the partners. Since all data is managed only in the system of the main contractor reusability of data is nearly impossible for supplying partners.

The second way would be to use an interface between two systems and to replicate data at certain points in time to enable access to common data. In this case it is nearly impossible to ensure consistent data, because modifications may occur on both sides. In addition, it requires  $n*(n-1)/2$  interfaces to connect all partners of the engineering team. Therefore, other concepts are required to enable real concurrent design across companies taking into account the security demands and intellectual property rights of all partners of the supply chain.

In order to fulfil such requirements the concept of a distributed workspace has been developed within SIMNET. Such a workspace is used to publish data in a controlled way. Publishing in this context means the creation of a node in the workspace that represents a link to a remote object at a partners site (see **Figure 3**). Therewith no "real" data is stored in the workspace itself.

The workspace provides a virtual engineering community (VEC) with a platform that allows a secure sharing of information and a centralised management of project dependent data, that is considered relevant for the organisation and control of the co-operation within the community, such as notification procedures and administrative information about users. It allows all partners to get an instant

look on the current stage of a project and the data that is available, while at the same time each partner controls the access to his data individually.

Within the workspace users are able to navigate through the data in a way that is independent from the current location of the data. Detailed information can be retrieved by following the link to the remote object at the partner side, that owns the data. Furthermore, the distributed workspace provides notification capabilities that can be used to inform users about updates of nodes.

In addition special nodes are used to represent system and interface parameters in order to manage projects based on cross-company engineering workflows. Such nodes are linked to all representations of the parameters stored in the local PDM systems of the partners.

### 3.2 Requirements and Demands regarding a Distributed Workspace

Sharing and exchange of product data across company borders strikes a very sensible area within a company. Knowledge and information are treated as very valuable goods that require special protection. Therefore, special attention will be put on security issues in terms of:

- granting access to data only for authorised personnel, that includes ensuring that a person can be clearly identified and
- secure data transport independent of the way the data has been accessed (using a web-client, a native PDM client or email).

Since access rights to the local data are granted at partner level each partner is able to monitor at any time who accessed what data at which time. Furthermore, this access can be revoked at any time if contractual problems or abuse of data occurs, without the need to ask a third party to shut down the access.

Another aspect is related to the parameter management itself. Since the concept presented in section 2 leaves a lot of possibilities of usage, the mechanisms used in the Workspace must not affect the implementation of each company. Partners only have to agree on a common strategy used within the workspace. That means local approval procedures and life-cycle definitions are not affected so the engineers can stick to their normal way of working. Mapping mechanism need to be implemented in the workspace to ensure at this level a common understanding of statuses and procedures.

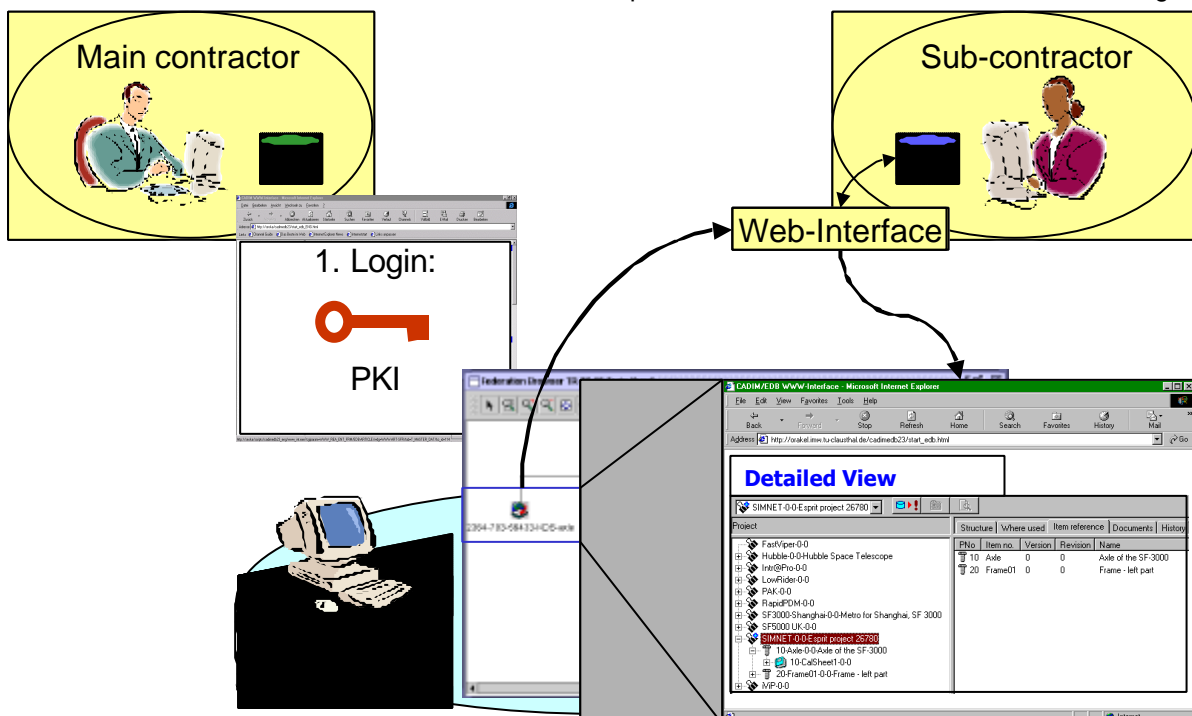
### 3.3 Deployment of the Distributed Workspace

During a kick-off meeting at the beginning of a project the partners need to define their common view on the desired product and the information that needs to be shared. Later on each partner links his information to the corresponding nodes. The evolving structure does not necessarily match the real product structure. It is more a work break down structure or project view on the product.

The distributed workspace is a server on its own that can be hosted by a service provider. Companies with multiple supplying partners are able to create a workspace for each project they are working on. All project participants are able to access the workspace using a web client. Using the distributed workspace as a central gateway to project relevant data enables efficient handling of information.

A user requests data via the web client. The login procedure is based on a public key infrastructure (PKI) that clearly identifies a user. If access to the workspace is granted the user may navigate the current node structure. If detailed information are required on a special node the workspace sends a request together with the login information of the current user to the web-interface of the local PDM system. There the local access rights are checked. If access is granted the data will be presented in a browser window (see **Figure 4**).

Applying the parameter approach as presented before, enables engineers to track the ongoing product development from one location. All requests for approval are directed by the Workspace to the in-box of the user. In case of a change within one system a notification is passed to the workspace which in return sends notifications to the other affected systems that host a representation of the modified parameter. Within the local systems approval workflows are executed depending on the partners' demands. The results are exchanged via



**Figure 4** Retrieving Data via the Workspace



the workspace which ensures the required synchronisation. /3/

A summary of information of a parameter is presented in the workspace, such as latest approved value and current state. This is especially useful if partners do not have a parameter management on their own. In this case a subscription mechanism can be used to keep them informed about the ongoing elaboration. Approval results are handled by the workspace to keep in sync with the overall approval procedures.

During the runtime of the SIMNET project a distributed workspace will be developed based on an axalant<sup>TM</sup> server that hosts project relevant data regarding the notification mechanism and links to original data of the partners systems.

### 3.4 Security Mechanisms deployed in the Distributed Workspace

The distributed workspace is based on the interconnections, through the internet, of the participating organisations. Within such a *Trusted Virtual Community*, the full spectrum of security services – encryption of messages, authentication of users, authorisation of services, integrity and non-repudiation of messages – is required for online interaction (e.g. web) and offline message exchanges (e.g. email).

The SIMNET security solution is based on state of the art standards – PKI (Public Key Infrastructure), TLS (Transport Layer Security) for online interaction and S/MIME (Secure Multipurpose Internet Mail

Extensions) for email – and additional functionality. Strong security is provided through 128+ bit (symmetric keys) and 1024+ bits (asymmetric keys) ciphers.

All the partners of the *Trusted Virtual Community* are peers, with the exception of a *Management Entity* (ME) that is independent from any single organisation and is trusted by all the members of the virtual community. The role of the ME is to implement the security policies decided by the community and make sure that the security is correctly enforced, while preserving the autonomy of the members (e.g. with regards to the “visibility” of the data); the ME is also the CA (*Certification Authority*).

The identification of users, their roles and privileges within the community, and their *Public Key* are managed by a Directory Service, based on the LDAP standard, distributed among the ME and the members. The portion of the directory service under the control of a specific organisation manages the local authorisation rights. Smart cards will be used to reinforce the security.

The deployed security mechanisms are used on one hand to determine access rights while a user is browsing through the workspace and on the other hand to prove the correctness of data by checking its digital signature. Therewith, the user can only see what is allowed by the assigned permissions. In addition, the access rights define whether a user is allowed to follow a link into the partner's database and/or to download files represented by nodes in the workspace. Furthermore, the access rights de-

termine which elements can be created, updated or deleted and what relations between nodes can be established.

Digital signatures are used to prove the correctness of links (avoiding guessing of links to other objects, that shall not be presented in the workspace) and the original author of a link. Thereto, the signature is made up of identifying attributes of an object and of the authors specific key whenever a user publishes objects stored in the partner's database. Only with

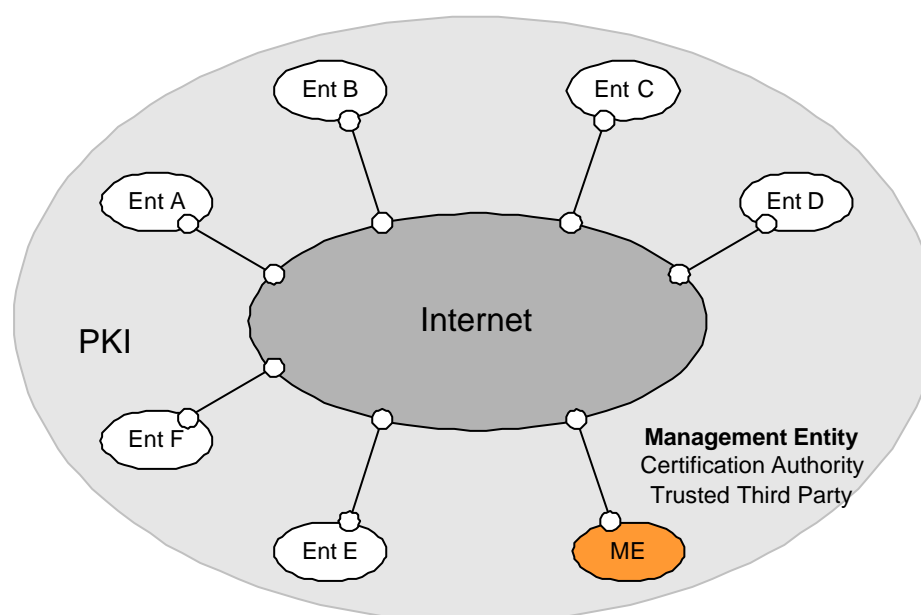


Figure 5 Security Infrastructure /4/



this key objects can be retrieved from a partners database via the workspace, as shown in **Figure 5**.  
/4/

#### 4 Conclusions

Today, the IT support for inter-company teams developing a complex product is limited to a "reactive" file exchange or access to a central PDM system. The presented parameter approach adds a "pro-active" aspect to virtual engineering communities. Whenever a parameter of common interest in the supply chain is generated or changed, the presented solution not only identifies the need for communication, but also triggers the communication in terms of notifying affected people independent from their company affiliation. Parameter-based approval and release procedures logged by a PDM system guarantee the necessary quality assurance even though documents (such as ECR and ECO) are not involved.

The presented architecture for a distributed workspace enables access to data needed to execute engineering tasks, even if the data is stored outside the company. The data is protected by state-of-the-art security mechanisms. In addition, the workspace provides communication and a document-free quality assurance in a distributed engineering environment.

Major benefits of the shown approach are:

- improved quality of engineering results, due to a better information base
- shortened throughput time regarding the product development and engineering change management,
- improved co-operation across company borders and
- enabling of an easy and secure access to data within a virtual engineering community.

The actual potential will be identified during the upcoming months by testing the prototype in the end-user environment of the SIMNET project.

#### 5 Acknowledgement

/1/ The SIMNET project - *Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks* - to which the above described results refer - is co-funded by the European Commission under the ESPRIT programme, No. 26780

The project partners are:

- Siemens SGP Verkehrstechnik GmbH, Graz, Austria (Co-ordinator)
- EIGNER + PARTNER AG, Karlsruhe, Germany
- Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH, München, Germany
- Mission Critical SA, Waterloo, Belgium
- BETA at Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands
- TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Germany
- IPS Ingeniería de Productos, Procesos y Sistemas Integrados S.L., Valencia, Spain

The author wishes to acknowledge the Commission for their support. He furthermore wishes to acknowledge the SIMNET project partners for their contribution during the development of various ideas and concepts presented in this paper.

For further information please check out the SIMNET web-pages

<http://www.imw.tu-clausthal.de/simnet>.

#### 6 References

- /2/ Rouibah, K.; Schmitt, R.; Caskey, K.; Goltz, M.: The SIMNET parameter based approach eases inter-company engineering change management; published at the International Conference on Concurrent Enterprising, Toulouse, 28-30 June 2000
- /3/ Goltz, M.; Schmitt, R.; Product Data Controlled Engineering Workflow in the Supply Chain; Proceedings of the ProSTEP Science Days 2000; Stuttgart; 13./14. September 2000
- /4/ Goltz, M.; Schmitt, R.; Vanden Bossche, M.: Managing the Development and Engineering Changes of Complex Products in a Distributed Engineering Environment; E-business: Key Issues, Applications and Technologies; IOS Press 2000

# Herstellung von Faserverbundbauteilen in Rapid Tooling Formen

Grünendick, T.; Trenke, D.

*Unter dem zunehmenden Druck wirtschaftlicher Gesichtspunkte und kürzer werdenden Entwicklungs- und Produktionszeiten ist es notwendig eine gezielte Kombination von Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren zu realisieren.*

*Unter diesen Voraussetzungen wurden Formen für innovative Faserverbundkonstruktionen mit dem generativen Fertigungsverfahren des Rapid Toolings erzeugt.*

*Under the view of economic increasing pressure and the reduce of development- and production times it is necessarily to realize an aimed combination of material qualities and production procedures.*

*Under these prerequisites, forms were generated for innovative fibersystem constructions with the generative production procedure of Rapid Tooling.*

## 1 Faserverbundbauweisen

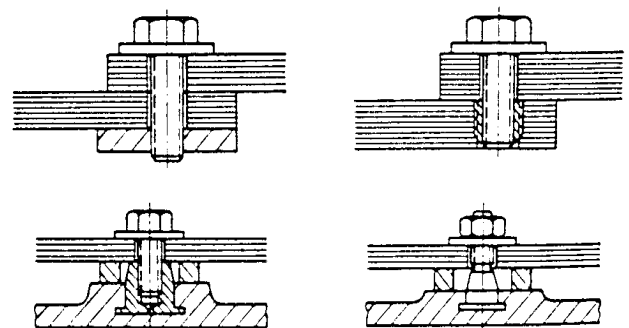
Im Flugzeugbau werden seit Jahren sehr erfolgreich hochbeanspruchte faserverstärkte Bauteile gefertigt und eingesetzt. Ein kürzlich abgeschlossenes Programm für den Entwurf und die Auslegung eines Flügels aus Kohlefaser Verbundbauweise (CFK) zeigt dies für einen Megaliner, der alle Erwartungen bzgl. Restfestigkeit und Bruchversuchen erfüllt. In der Triebwerkstechnologie bietet die Anwendung von faserverstärktem Kunststoff (FVK) z. B. als Verdichterschaukel neue aerodynamische Gestaltungsfreiheiten, insbesondere im transsonischen Bereich (Schaufelspitzen Geschwindigkeiten von 400 m/sec). Dabei hat die FVK-Schaukel bei gleicher Festigkeit nur ein Drittel des Gewichts von Titan. Nicht nur diese Beispiele zeigen die hohe Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der faserverstärkten Composites, sondern auch andere Bereiche aus der Luft- und Raumfahrt unterstreichen die guten Eigenschaften, wie z. B. die Mittelkonstruktion des Space Shuttle (besteht vorwiegend aus B/Al-Rohren) oder sämtliche Hauptrotorblätter und Höhenleitwerke verschiedener Hubschraubertypen, /1/.

Bei der Umsetzung von Faserverbundbauweisen für umfassende Einsatzgebiete des Maschinenbaus bestehen, abgesehen von wenigen Ausnahmen, jedoch noch erhebliche Vorbehalte. Diese Vorbe-

halte begründen sich hauptsächlich auf Berührungssängste mit den anisotropen Werkstoffeigenschaften, die erforderliche Kenntnis der Belastungen und den kostenintensiven Aufwand bei Bauteiländerungen. Abgesehen von dem kostenintensiven Änderungsaufwand, lassen sich die erstgenannten Eigenschaften zum Vorteil umkehren. Die Werkstoff- und Bauteileigenschaften können somit, je nach Matrix, Faser und ihrer Anordnung, maßgeschneidert aufeinander abgestimmt werden. Voraussetzung ist natürlich die dementsprechende Kenntnis der Belastung und ihres Zusammenwirkens.

## 1.1 Konstruktion und Berechnung

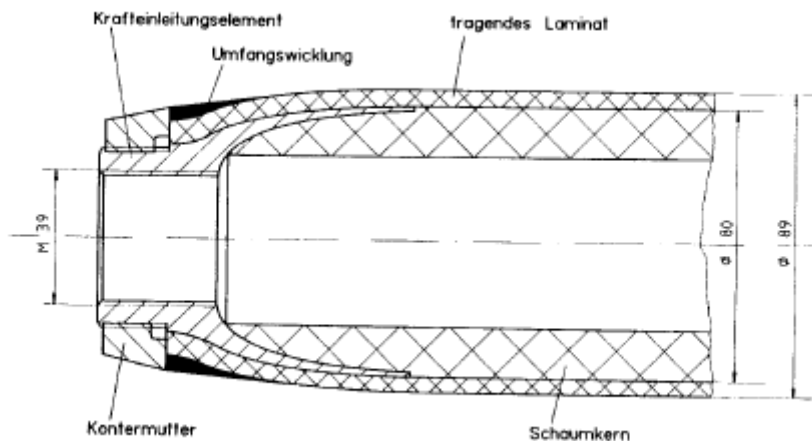
Faserverstärkte Kunststoffe sind grundsätzlich wegen der anisotropen Werkstoffeigenschaften sehr attraktiv. Hiermit lassen sich Bauteileigenschaften erstellen, die mit metallischen Werkstoffen nicht möglich, die äußerst Ziel- bzw. Anwendungsorientiert sind und zudem erhebliche Potentiale in der Gewichtseinsparung bereitstellen. Daraus ergeben sich natürlich spezielle Konstruktionsregeln, die beachtet werden müssen. Besonderes Augenmerk muß hier auf die Krafteinleitung, den Kraftfluß (Radien), die Verbindung einzelner Komponenten (vgl. Bild 1) und je nach E-Modul des Composites auf Versteifungen gelegt werden. Die VDI 2012 gibt für glasfaserverstärkte Kunststoffe einen umfassenden Überblick, /2/.



**Bild 1:** Schraubenverbindungen von FVK, /2/

Bei Gemischtbauweise mit Metallen müssen die Spannungssprünge auf Grund der Differenzen der

E-Module beachtet werden. Bei Wellen beispielsweise werden metallische Krafteinleitungselemente mit integriert, die aber geometrisch so ausgeführt sind, dass sie einen zu starken Steifigkeitssprung und damit einen erhöhten mehrachsigen Spannungszustand vermeiden. **Bild 2** zeigt ein Krafteinleitungselement, bei dem durch abnehmende Wandstärke ein starker Steifigkeitssprung vermieden wird.



**Bild 2:** Formschlüssige Krafteinleitung, /3/

Metallische Werkstoffe haben ein isotropes Elastizität- und Festigkeitsverhalten. Damit genügt es die Hauptnormalspannungen zu kennen, um eine äquivalente Spannung, die Vergleichsspannung, zu ermitteln. Diese Vergleichsspannung wird mit der Festigkeit des Werkstoffes (einachsige Beanspruchung) verglichen. Ist die Vergleichsspannung größer, so ist mit einer Schädigung des Bauteils zu rechnen.

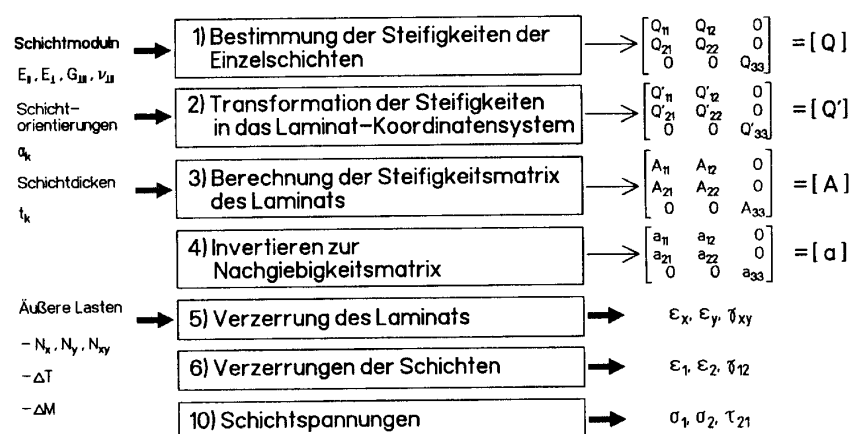
Bei FVK liegt ein anisotropes Verhalten der Elastizität und Festigkeit vor. Deshalb hängen die Beanspruchungen nicht nur von der Größe der Hauptnormalspannungen ab, sondern auch von der Faserrichtung. Damit läßt sich keine Vergleichsspannung wie bei isotropen Werkstoffen definieren. Man muß ferner die Beanspruchungen schichtweise auf bestimmte Richtungen beziehen, für die Festigkeitswerte bekannt sind, und miteinander in einem funktionalen Zusammenhang

vergleichen. Dies ermöglicht dann je nach Versagensart – Zwischenfaserbruch oder Faserbruch – das Aufstellen von Bruchbedingungen, die eine Aussage über das Versagen des Bauteils zulassen. Hier existieren Bruchbedingungen von Puck, Tsai Wu und Tresca.

Zur Vorauslegung einer vernünftigen Faseranordnung, bei denen die Kräfte überwiegend von den Fasern aufgenommen werden, eignet sich die

Netztheorie. Die Netztheorie eignet sich ebenso zur Ermittlung der erforderlichen Schichtdicken, vernachlässigt aber den Anteil der Matrix an der Tragfähigkeit. Zur schichtweisen Spannungs- und Verformungsanalyse muß jedoch das Mittragen der Matrix berücksichtigt werden. Dies wird mit der klassischen Laminattheorie (CLT) erreicht, die außerdem eine verfeinerte Festigkeitsanalyse unter Berücksichtigung der Lastübertragung durch die Matrix ermöglicht. Mit Hilfe der Fini-

ten-Elemente-Methode (FEM) lassen sich auch komplexe Strukturen auslegen und optimieren. Als Bruchbedingung dient hier vielfach das Tsai Wu Kriterium. **Bild 3** zeigt das Berechnungsvorgehen bei der CLT.

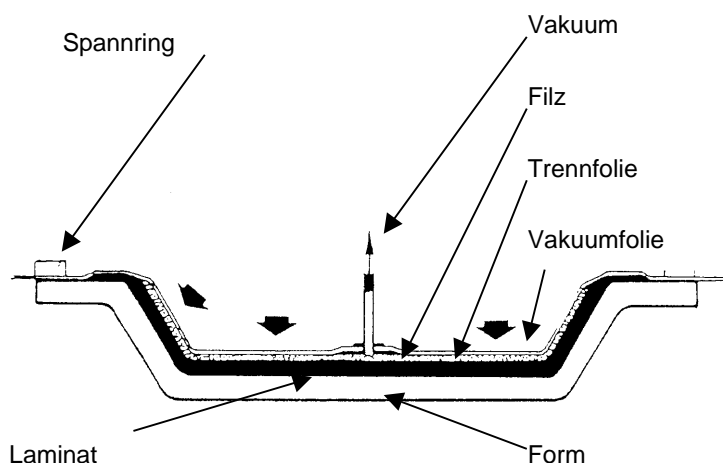


**Bild 3:** Berechnungsschritte der CLT, /3/

## 1.2 Fertigungsverfahren

Die Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen erfordert kostengünstige und sichere Herstellungsverfahren für die Faseranordnung und das Tränken der Faserstruktur mit dem Harz. In [4] sind verschiedene Herstellungsverfahren aufgeführt.

Die Wickeltechnik zählt zu den am meisten verwendeten automatisierten Fertigungsverfahren und wird überwiegend für symmetrische Bauteile eingesetzt. Für Bauteile beliebiger Gestalt eignet sich z. B. das RTM-Verfahren (Harzinjektionstechnik). Zwischen zwei Formhälften, die das Negativ des Bauteils darstellen, wird das Fasermaterial, der Kern und gegebenenfalls Metallinserts eingelegt. Nach Schließen der Formhälften erfolgt das Injizieren des Harz-Härter-Systems mit anschließendem Aushärten bei entsprechender Temperatur. Die Injektions- und Abflußbereiche müssen bei diesem Verfahren gezielt platziert werden, damit keine Bereiche entstehen, die nicht mit Harz benetzt sind.



**Bild 4:** Vakuumsack-Verfahren

Als Alternative zum RTM-Verfahren bietet sich das Vakuumsack-Verfahren an (siehe **Bild 4**). Bei dieser Methode wird eine einteilige Form verwendet, in der das Laminat mit Prepregs oder im Handlaminierverfahren aufgebaut wird. Die Faserverbundprepregs sind mit Harz vorimprägnierte Fasergebilde, wie Gewebe oder unidirektionale Fäden. Das eingelegte Material wird dann mit einer flexiblen, gelochten Folie abgedeckt. Auf diese Folie kommt ein Filz, um ein gleichmäßiges Vakuum zu gewährleisten. Über diesen Verbund wird am Schluß eine Vakuumsackfolie gelegt, abgedichtet und der Zwischenraum evakuiert. Der atmosphärische Druck

bewirkt das gleichmäßige Verdichten des Laminates.

Die Formen für das Vakuumsack-Verfahren können durch alle etablierten Fertigungsverfahren hergestellt werden. Eine interessante Alternative stellt aber das Rapid Tooling dar.

## 2 Der Rapid Tooling Bauprozess

Ein Hauptthema für eine stärkere Verbreitung der Faserverbundtechnologie ist die immer noch aufwendige Formherstellung. Gerade in der RTM-Technik werden, aufgrund der schwierig vorauszuberechnenden Harzflussfronten, zahlreiche Vorabformen benötigt. Dies verlängert in erheblichen Maße die Zeit, bis das fertige Produkt auf dem Markt eingeführt werden kann.

Abhilfe vermag hier das generative Herstellungsverfahren des Rapid Toolings zu leisten, durch das innerhalb kürzester Zeit einsatzfertige, metallische Formen herstellbar sind.

Da es sich hierbei um ein relativ neues Verfahren handelt, wird in diesem Kapitel zunächst der Rapid Tooling Bauprozess des Direct Metal Laser Sinterings (DMLS) der Firma EOS beschrieben.

### 2.1 Das DMLS-Verfahren

Der DMLS-Bauprozess beginnt damit, dass die 3D-CAD-Konstruktion des zu generierenden Bauteils in dünne Schichtinformationen von gewöhnlich 0,05 mm zerlegt wird. Dieser Vorgang des „Slicens“ geschieht noch am CAD-Arbeitsplatz, mit einer dafür speziell programmierten Software. Anschließend werden die Schichtinformationen zur

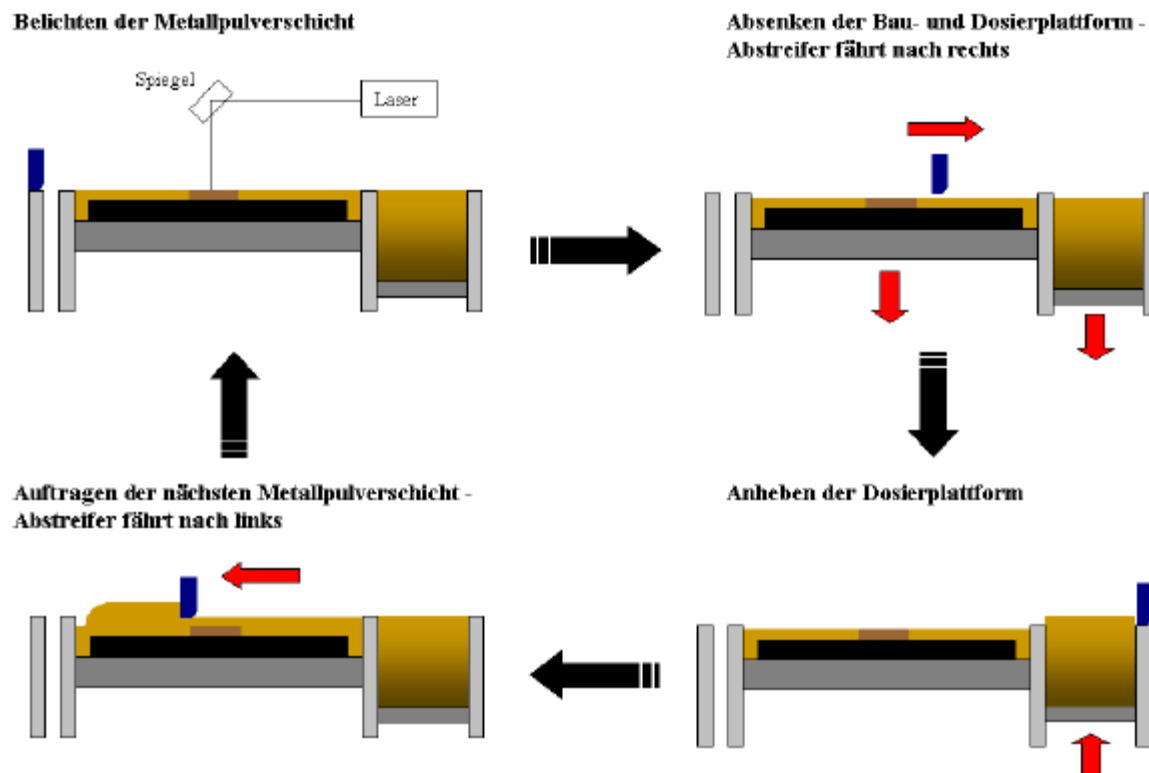
Rapid Tooling Anlage (EOSINT M 250) übertragen, wo dann entsprechend diesen Informationen das stoffliche Modell mittels eines Lasers schichtweise generiert wird.

Die Rapid Tooling Anlage selbst besteht im wesentlichen aus folgenden 4 Komponenten:

- dem Laser, zum Aufschmelzen des Metallpulvers,
- der Trägerplattform mit aufgesetzter Bauplatte,
- der Dosierplattform zur Bevorratung des Metallpulvers,
- dem Abstreifer zum Auftragen des Metallpulvers.

Zu Beginn des Sinterprozesses wird die Bauplattform erstmalig mit einer dünnen Metallpulverschicht (0,05 mm) bedeckt. Diese Schicht wird dann, entsprechend der ersten Schichtinformation über die Geometrie des herzustellenden Bauteils, von einem CO<sub>2</sub>-Laser aufgeschmolzen (siehe **Bild 5**). Nachdem so die erste Schicht belichtet ist, wird die Bauplattform um die nächste Schichtdicke (0,05 mm) abgesenkt und der Abstreifer bis zum Anschlag rechts von der Dosierplattform gefahren. Ist er dort angekommen, wird die Dosierplattform soweit angehoben, bis genügend Pulver zur Verfügung steht, um die Bauplattform erneut vollständig zu bedecken.

Jetzt fährt der Abstreifer wieder nach links und trägt so die nächste Pulverschicht auf, die dann entsprechend der zweiten Schichtinformation über das Bauteil vom Laser aufgeschmolzen wird.



**Bild 5:** Schichtweiser Aufbau beim Lasersintern

Die Belichtungsparameter werden beim Bauprozess so gewählt, dass sich die neue Schicht mit der darunterliegenden fest verbindet.

Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis aus den CAD-Informationen ein vollständiges, dreidimensionales, stoffliches Bauteil entstanden ist.

## 2.2 Gestaltungsregeln für den Formenbau

Neben den Konstruktionsanforderungen für den Rapid Tooling Bauprozess müssen bei der Gestal-

tung der Form auch Besonderheiten der Faserverbundtechnologie berücksichtigt werden. Diese werden im folgenden kurz erläutert.

### 1. Entformungsschrägen:

Damit das Werkstück leicht und ohne Beschädigungen aus der Form entnommen werden kann, müssen sowohl Formober- als auch Formunterseite ausreichende Entformungsschrägen besitzen. Diese sollten in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit der Kavität mindestens 5° betragen.

Des weiteren sollten Ecken und Kanten verrundet, Hinterschneidungen vermieden und Radien möglichst groß ausgelegt werden.

### 2. Aufbrechnuten:

Um die Form nach dem Aushärten überhaupt öffnen zu können, sind in den Formhälften Aufbrechnuten vorzusehen. Dies ist besonders bei rauen Teilungsebenen wichtig, da diese durch den verwendeten Harz fest miteinander verkleben.

### 3. Führungsbolzen:

Um ein Verkannten oder Versatz der Formhälften beim Öffnen und Schließen zu verhindern, müssen Führungsbolzen eingesetzt werden.

#### 4. Dichtungsnuten:

Zwischen den Formhälften befindet sich eine Dichtung, die ein seitliches Austreten von Harz verhindern soll und den Aufbau des Unterdruckes - für die RTM-Technik - ermöglicht. Um ein Verschieben der Dichtung zu vermeiden, werden diese in eine Nut eingelegt.

#### 5. Ansaug- und Angußkanal:

Durch einen rechtwinkligen Verlauf des Angußkanals kann der ausgehärtete Harz leicht ausgebohrt werden. Um einen sicheren Halt der Saug- bzw.-Druckzuleitungen mit der Form zu gewährleisten, sind die Kanäle mit einem entsprechenden Gewinde auszustatten.

#### 6. Ansaug- und Einspritzkammer:

Die Harzansaug- und Einspritzkammern sind so flach wie möglich auszuführen, um eine Gratbildung durch überflüssiges Harz zu vermeiden. Dieser Grat müsste in einer späteren Nachbearbeitung entfernt werden, was zu einer Schädigung des Fasergefüges - und damit der Bauteilfestigkeit - führt.

#### 7. Oberflächenqualität:

Die Oberfläche der Kavität muss möglichst glatt sein, um zu verhindern, dass sich Harz um Oberflächenspitzen legt und dadurch das spätere Entformen erschwert. Zudem überträgt sich die Oberflächenrauheit der Kavität auf das Werkstück, was gerade bei Faserverbundwerkstücken zu einer Festigkeitsabnahme des Bauteils führt. Die Oberfläche der Kavität ist dementsprechend auf eine mittlere Rauigkeit von ca. 4 µm zu polieren und mit einem geeigneten Trennmittel zu behandeln, welches Oberflächenunebenheiten ausgleicht, sowie Kavität und Werkstück voneinander trennt.

#### 8. Überlaufkammern:

Um austretendes und überflüssiges Harz aufnehmen zu können, sollte die Form über symmetrisch angeordnete Überlaufkammern verfügen, die über dünne Zuläufe mit der Kavität verbunden sind. Die Zuläufe sind erforderlich, um die Gratbildung am Bauteil zu minimieren.

### 3 Bau einer Rapid Tooling Probeform

Zunächst überlegten wir, wie ein Faserverbundbauteil gestaltet sein müsste, dass sowohl sämtliche konstruktive Gesichtspunkte erfüllt, als auch möglichst viele Fragen in Bezug auf die Verarbei-

tung und die Qualität von FVB-Werkstücken beantwortet. Dazu stellten wir folgenden Anforderungskatalog auf:

#### I) konstruktive Forderungen:

- gleiche Wandstärken über den gesamten Bauteilquerschnitt
- Vermeidung von Materialanhäufungen
- keine Hinterschneidungen
- verrundete Ecken und Kanten
- keine Durchbrüche
- ausreichende Anzahl und Anordnung von Laminatschichten

#### II) zu untersuchende Werkstückeigenschaften:

- Detaillierung von Prägungen
- Oberflächenqualität
- Qualität der Ränder
- Biegesteifigkeit
- mechanische Festigkeit

#### III) Fragen zur Verarbeitung:

- Zuschneidverhalten der Fasern
- Einlegbarkeit der Fasern in die Kavitäten
- Entformbarkeit des Werkstücks
- Qualität und Wahl des Trennmittels
- Durchführung des Aushärtprozesses

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen ergab sich damit folgendes beispielhafte Bauteil (siehe **Bild 6**), für das eine Rapid Tooling Form konstruiert wurde.

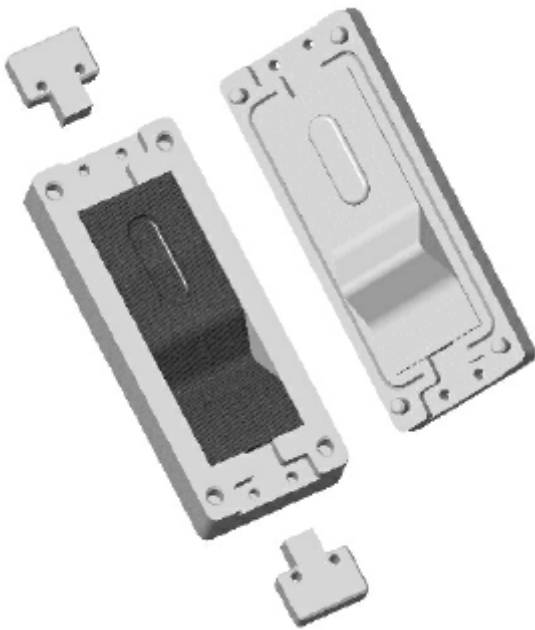


**Bild 6:** Probebauteil aus Faserverbund

Bei der Gestaltung der Form (siehe **Bild 7**) stand insbesondere das Kriterium der leichten Entformbarkeit im Vordergrund. Aufgrund der relativ hohen Oberflächenrauigkeit von lasergesinterten Bauteilen, und der zusätzlichen Haftwirkung durch überschüssiges Harz, wählten wir als Entformungsschragen 6°.

Zusätzlich befinden sich an den Stirnseiten der Form zwei Schieber, die nach dem Aushärten des Werkstücks zu Seite gezogen werden, um so ein Aushebeln des Bauteils aus der Form zu ermöglichen.

Um die Kavitäten formschlüssig und ohne Verkannten schließen zu können, sind an der oberen Formhälfte Führungsbolzen und an der unteren Hälfte die entsprechenden Bohrungen angebracht. Dieses Führungssystem wurde im Sinterprozess mit erzeugt, wodurch eine nachträgliche Herstellung entfällt.



**Bild 7:** Formhälfen, Schieber und FVB-Werkstück

Zur Ermittlung des Prägeverhalten ist in die untere Formhälfte ein Langloch eingearbeitet. An der oberen Formhälfte befindet sich die entsprechende Erhebung, um eine Stempelwirkung zu erzielen und gleichzeitig die Forderung nach einer gleichbleibenden Laminatdicke zu erfüllen.

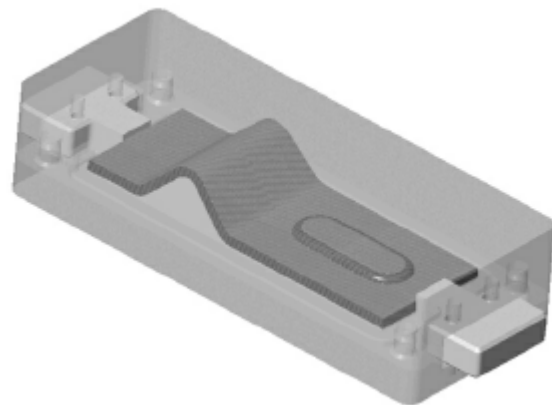
Der gesinterte „Berg“ diente zur Bestimmung des Spannungsumlenkungsverhaltens innerhalb der Faserverbundstruktur. An ihm kann insbesondere das Knick- und Biegeverhalten ermittelt werden.

Sämtliche innen liegenden Kanten sind mit einem Radius von min. 2 mm versehen. Die äußere Kon-

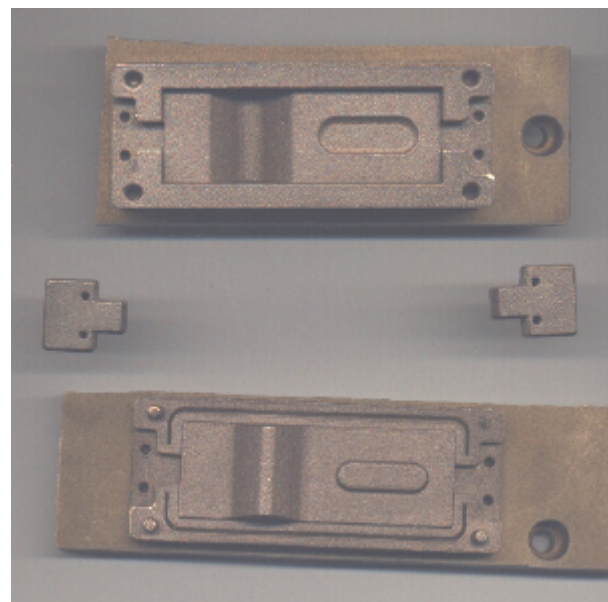
tur wurde nicht verrundet, um die Qualität der Stirn- und Seitenränder besser kontrollieren zu können. Zudem würden Radien hier zu einer Stauchung von einzelnen Fasern führen.

In der oberen Formhälfte befinden sich Nuten, um ein Abfließen von überschüssigen Harz zu gewährleisten.

Die nachfolgenden Bilder zeigen noch einmal die geschlossene Form mit eingelegtem FVB-Bauteil als Computermodell (siehe **Bild 8**) und die auf der Rapid Tooling Anlage gesinterte Formhälfen und Schieber (siehe **Bild 9**).



**Bild 8:** geschlossene Form mit eingelegtem Laminat



**Bild 9:** lasergesinterte Bauteile

#### 4 Herstellung des FVB-Werkstücks

Die praktische Herstellung eines Faserverbundbauteils beginnt mit dem sorgfältigen Zuschneiden der einzelnen Laminatschichten. Hierbei müssen



zum einen die Ausrichtungen der Fasern, als auch Änderungen in der Bauteilgeometrie (z.B. durch Entformungsschrägen) berücksichtigt werden.

Da wir als Laminat Fasergewebe mit einer Ausrichtung von 0° und 90° verwendet haben, wurden die einzelnen Schichten um jeweils 45° versetzt eingelegt.

Um die erforderliche Bauteilhöhe und einen angemessenen Stempeldruck - durch die obere Formhälfte - zu erreichen, waren insgesamt 10 Faserlagen erforderlich.

Zur Vorbehandlung der Formhälften verwendeten wir eine Trennmittel-Versiegler Kombination.

Neben der guten Trennwirkung und Temperaturbeständigkeit zeigte diese keine Reaktionen mit der Form oder dem Werkstück.

Nach dem Einbetten des Laminats wurde die Form verschlossen, mit Hilfe eines Vakuumsackes evakuiert und in diesem Zustand für eine Stunde bei 160°C ausgehärtet.

Das anschließende Entformen mußte im noch heißen Zustand erfolgen.

Die Entnahme des Bauteils stellte sich als sehr schwierig heraus. Ursache hierfür ist die hohe Oberflächenrauigkeit der Rapid Tooling Form und das teilweise Einfließen des Harzes in die poröse Form. Zu Überprüfen ist, ob größere Entformungsschrägen die Entnahme erleichtern, bzw. andere Trennmittelsysteme eine adhäsionspassivere Oberflächenbeschaffenheit bewirken.

Um den Harz vollständig auszuhärten, muß das Bauteil abschließend noch für 10 Stunden bei 100°C getempert werden.

Das fertige Werkstück (siehe **Bild 10 u. Bild 11**) weist eine überwiegend glatte Oberfläche auf und läßt deutlich die Struktur des Gewebes erkennen.



**Bild 10:** Faserverbundbauteil

Dies bedeutet, dass durch den richtig gewählten Stempeldruck keine Fasern gequetscht oder beschädigt wurden. Hierfür spricht auch der glatte und

gleichmäßige Bauteilrand und das sichtbar ausgeprägte Langloch.

Trotz der geringen Anzahl von Schichten ist die Gesamtfestigkeit des Bauteils recht hoch. Im Bereich des Berges machen sich aber unter Belastung Biegeerscheinungen bemerkbar.

Abhilfe könnte hier ein kleinerer Winkel, oder die Einarbeitung von Versteifungen schaffen.

Der Verzug des Werkstückes durch Eigenspannungen ist minimal. Eine leichte Krümmung der Grundfläche ist bei der Entnahme aus der Form entstanden.



**Bild 11:** gesinterte Formen mit FVB-Bauteil

## 5 Zusammenfassung

Kombiniert man nun das Vakuumsack-Verfahren mit Formhälften, die im Rapid Tooling Verfahren hergestellt werden, so ergeben sich für die Fertigung von Faserverbundbauteilen spezielle Vorteile:

- zwei Formhälften
- gleichmäßiges Vakuum durch porösen gesinterten Werkstoff

Bei dieser Kombination übernimmt die Rapid Tooling Form durch ihre porösen Eigenschaften die Aufgaben des bei dem klassischen Vakuumsack-Verfahren verwendeten Filzes. Voraussetzung ist natürlich eine adhäsionspassive Oberflächenbeschaffenheit der Rapid Tooling Form, also eine Oberfläche mit semipermeablen Eigenschaften. Durch eine entsprechende Beschichtung (Versiegler-Trennmittel-System) läßt sich so diese Funktionsschicht erreichen.



**6 Literatur**

- /1/ N., N.: Nicht nur in der Flugzeugindustrie, Ingenieur Werkstoffe 7/8-93, 24-25
- /2/ N., N.: Gestalten von Werkstücken aus GFK, Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2012, Juni 1969
- /3/ Michaeli, W.; Huybrecht, D.; Wegener, M.: Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen, Hanser Verlag, München, 1995
- /4/ Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen, Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix, Springer Verlag, 1998

# Anforderungen von VirtualReality als Entwicklungswerkzeug an den Produktentstehungsprozess und seine Datenstrukturen

Beisheim, N.

*Der effektive Einsatz von VirtualReality (VR) in der Konstruktion technischer Produkte erfordert einen durchstrukturierten Informationsaustausch aller an der Entwicklung Beteiligten. Dieser Austausch wird durch Schnittstellenproblematiken zwischen einzelnen Programmen wie z.B. CAD- und VR-Programm erschwert. Der Artikel zeigt ein neues Konzept zur durchgehenden Strukturierung der Daten einschließlich der speziell für das VR-Design benötigten Informationen über den gesamten Produktentstehungsprozess und erklärt seine Anwendung an Hand einer Beispielkonstruktion.*

The use of virtual reality in an effective way needs a continuous structure of information. The structure must include all persons who are involved in the engineering process. The interfaces between the computer systems like CAD- and VR-software are an other problem. This paper shows a concept to get a structure to manage all information of the engineering process which the VR-designer needs for his work and explains the implementation in a knowledge based system.

## 1 Kennzeichen für Virtual Reality

Seit einigen Jahren ist der Begriff VirtualReality (VR) im Zusammenhang mit der Abbildung realer dynamischer Objekte durch den Computer großen Teilen der Bevölkerung bekannt geworden. Diese "Erfahrungen" beziehen sich auf Kinofilme mit sehr realistischen Animationen künstlicher Welten oder Objekte wie in "Jurassic Park" oder "Titanic". Auch in den Medien wird mit kurzen Filmsequenzen über die Anwendungen von VirtualReality berichtet, bei denen es sich z.B. um virtuelle Rundgänge durch historische Gebäude als auch virtuelle Objekte wie den Jumbo A3xx handelt. Das einfache Betrachten der Animation von Objekten ist aber noch keine Anwendung von Virtual Reality. Erst mit den Merkmalen der Präsenz, der Interaktion und der Bewegung in Echtzeit wird aus der bloßen Animation eine solche Anwendung.

Die Präsenz ist dabei die Möglichkeit, sich selbst in einem virtuellen dreidimensionalen Raum zu bewegen und nicht nur die Ansichten von Objekten in

dem Raum zu ändern, wie es mit CAD-Systemen möglich ist.

Das Merkmal Interaktion ist die Möglichkeit, durch Programmierung von speziellem Objektverhalten ihr reales meistens dynamisches Verhalten in die Virtualität zu übernehmen. Beispiele für Interaktionen sind Farbänderungen oder die einsetzende Bewegung des aktivierten Objekts. Die Aktivierung kann sowohl von dem Anwender des Systems als auch als Kette von Interaktionen durch Aktivierung der Objekte untereinander ausgelöst werden.

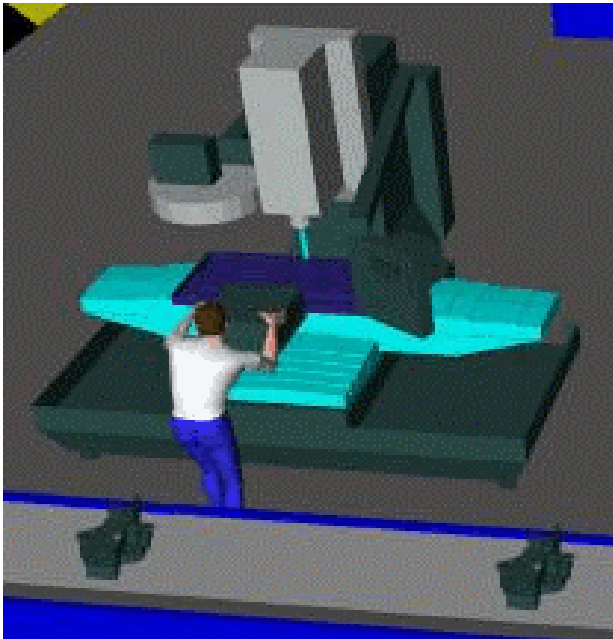
Die Echtzeitfähigkeit eines Modells im VR-System hängt direkt mit der Modellgröße und der Rechnerleistung zusammen. Um einen guten visuellen Eindruck von Bewegungen zu bekommen, muss das Bild 25 mal in der Sekunde wiederholt werden. Die Rechenleistung heutiger Standard PC's (PIII 600 MHz, 256 MB) reicht nicht einmal, um einfache Modelle in Echtzeit zu bewegen. Für umfangreiche Modelle ist deshalb der Einsatz von großen Rechenanlagen nötig. Die größten Anlagen nutzen dabei die Filmindustrie und das Militär.

## 2 Anwendungsfelder von Virtual Reality

Die Anwendungsfelder für VirtualReality sind bisher hauptsächlich in den Unternehmen der Luft-, Raumfahrt- und Automobilindustrie zu finden. Je nach Einsatzzweck und -zeitpunkt spricht man von:

- Virtual Prototyping
- Virtual Design
- Virtual Manufacturing
- Virtueller Fabrik- und Anlagenplanung
- Master-Slave-Systeme

Virtual Prototyping ersetzt den Bau von physikalischen Prototypen oder verringert deren Anzahl. Das Ziel ist es, mit dem virtuellen Modell viele der Untersuchungen durchzuführen, die sonst erst mit dem physikalischen Prototyp gemacht werden könnten, denn virtuelle Modelle sind kostengünstiger als andere Arten von Prototypen. Beispielhafte Anwendungen sind Crash-, Schwingungs- und Dynamiksimulationen.



**Bild 1:** Fräsmaschine und Mannequin /2/

Der frühestmögliche Zeitpunkt zum Einsatz von VR ist die Durchführung von Designstudien, z.B. bei der Neuentwicklung von Autos. Die kostengünstige und zeitsparende Möglichkeit umfangreiche Studien durchzuführen, bei denen nicht nur das Ändern der Kontur möglich ist, sondern bei denen auch Funktionalitäten wie Türöffnen und Lenkbewegungen getestet werden können, hat VR schnell zum unentbehrlichen Entwicklungswerkzeug gemacht. Dabei ist es unerheblich, ob das Innenleben eines Autos oder einer Fabrikhalle, wie bei der Fabrik- und Anlagenplanung, das Objekt der Betrachtung in VR ist. Durch Präsenz und Interaktion mit dem Objekt überzeugt VirtualReality in der Anwendung, genügend Rechenleistung für flüssige Animationen vorausgesetzt.

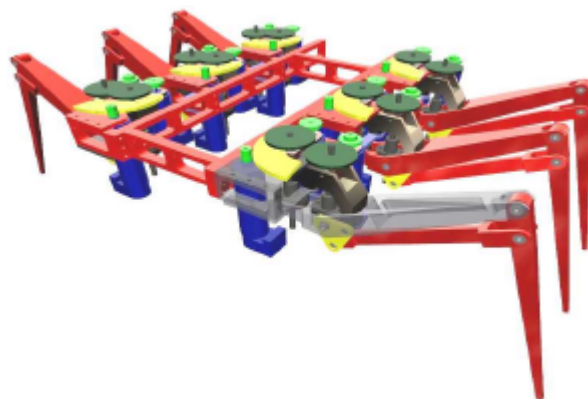
Auch die Fertigung und Montage der Produkte kann das Objekt der Simulation mit VR sein. Dabei werden die Fertigungseinheiten in der digitalen Welt in Geometrie und Funktionalität abgebildet. Das Ziel der Simulation ist es nun, die geeignete Fertigungseinheit und ihre optimalen Betriebsparameter zu ermitteln. Beispiele sind Simulationen mit Fräsmaschinen wie in **Bild 1** gezeigt und von Montagevorgängen von komplexen Maschinen mit entsprechender Kollisionserkennung.

Bei konsequenter Anwendung von VirtualReality im Entwicklungsprozess können vom virtuellen Designobjekt über den virtuellen Prototyp bis zur Durchführung der virtuellen Fertigung und Montage in einer mit VR geplanten Fabrik alle Informationen als Datenmodell vorliegen. Dieses digitale Modell entspricht dann dem realen physikalischen Objekt

in seinem Zustand nach einigen Iterationen zwischen den Entwicklungsphasen.

Zunehmende Bedeutung bekommt der Bereich der robotischen Anwendungen. Dabei werden nicht nur die mechanischen Bewegungen der Roboter im VR-System abgebildet, sondern die Funktionalität der Steuerungssoftware der Roboter gleichzeitig getestet. **Bild 2** zeigt die mechanische Antriebseinheit eines Roboters zum Erkunden von unwegsamen Geländen.

Zu einem Master-Slave-System wird das Ganze, wenn der Nutzer das virtuelle Abbild des Objekts, in dem Fall den Roboter, in einer virtuellen Umgebung steuert. Das physikalisch reale Objekt macht dann die Bewegungen seines virtuellen Spiegelbilds in der realen Umgebung nach, weil es über Datenschnittstellen mit dem VR-Programm verbunden ist. Eingesetzt werden solche Systeme, wenn die direkte visuelle Kontrolle des Roboters nicht möglich ist z.B. in Kernkraftwerken und auf anderen Planeten.



**Bild 2:** Antriebseinheit eines Roboters zur Erkundung /1/

### 3 Informationsbedarf zur Durchführung von VR-Studien

Der VirtualReality Designer benötigt zur Durchführung der Kinematikstudien nicht nur die CAD-Geometriedaten des CAD-Konstrukteurs sondern auch die Daten der realen Funktions- und Bewegungsmuster des von ihm zu animierenden Objekts. Die Funktions- und Bewegungsdaten setzen sich aus den Hierarchie-, Wirkstrukturinformationen und physikalischen Parametern des Objekts zusammen.

- Die Hierarchieinformationen sind die Daten über die Anordnung der Teilsysteme, Komponenten, Baugruppen etc. zu einander.

- Die Wirkstrukturinformationen umfassen die Positionen und Orientierungen der Bewegungsachsen, um damit Einschränkungen in den Freiheitsgraden (Constraints) der Objekte zu definieren.
- Die physikalischen Informationen sind die Bewegungsgleichungen für die Aktionen. Für eine genaue Abbildung der realen Bewegungen im VR-System ist die Verwendung der exakten Bewegungsmuster unerlässlich.
- Für die Animationen von Fertigungsvorgängen kommen dann noch Daten über fertigungstechnische Anlagen und ihre Parameter hinzu.
- Weitere Informationen z.B. Werkstoff- und Oberflächendaten wie Texturen werden über Relationen mit den Objekten verbunden. Während die Materialkennwerte zur Realisierung wirklichkeitsnaher Animationen gebraucht werden, verbessern die Texturen mit den enthaltenen Oberflächeneigenschaften die visuelle Darstellung der Objekte.

Der VR-Designer ist damit eine Informationssenke, bei dem im konsequent angewandtem Einsatz von VR alle Produkt- und Produktionsdaten zusammenkommen und auf ihre Konsistenz hin getestet werden.

#### 4 Schnittstellenproblematik zwischen Software und den Konstrukteuren

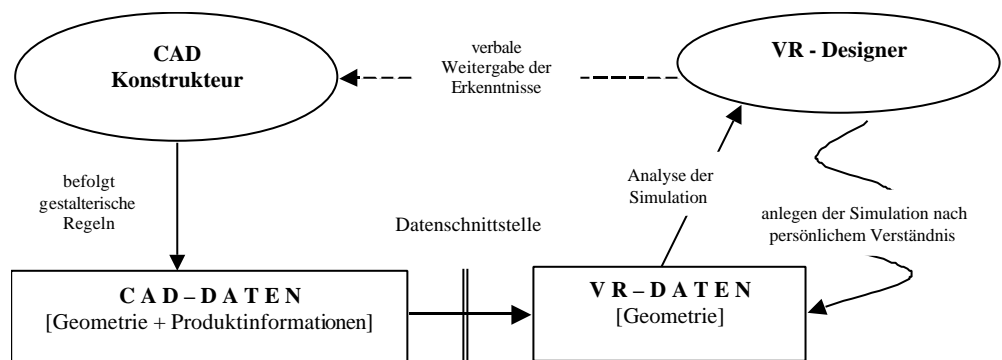
Nachdem der CAD-Konstrukteur mit seinen Zeichnungen der Geometrie fertig ist, werden diese Daten des 3D-Modells über Dateischnittstellen in die VR-Software eingelesen. Für eine Beschleunigung der Darstellung der Geometrie im VR-System, auch als Real-Time Rendering bezeichnet, werden Details der Geometrie reduziert, z.B. Kreise werden zum n-Eck, damit die Oberflächen der Objekte als Polygonzüge dargestellt werden können. Der VR-Designer ergänzt nun die Informationen, die nicht über die Schnittstelle vom CAD-System mit übertragen werden konnten. Je nach Art der Schnittstelle können das sein:

- Hierarchiestrukturen der Objekte
- Textur und Oberflächendaten

- Sonstige Eigenschaften wie Materialkennwerte, etc.

Außerdem fehlen den Objekten sämtliche Eigenschaften, die ihre Funktion und Bewegung betreffen. Der VR-Designer ergänzt diese Informationen nach Zeichnungen und anderen Unterlagen und nach seinem Erfahrungswissen. Bei Unklarheiten muss er Rücksprache mit dem CAD-Konstrukteur halten.

Hat der VR-Designer alle Informationen zusammengetragen und ergibt seine Simulation der Objekte in der virtuellen Realität eine Notwendigkeit zur Änderung von Geometriemerkmalen z.B. weil zwei Objekte miteinander kollidieren, so kann er nur den CAD-Konstrukteur darauf hinweisen, damit dieser die Geometrie ändert. Er selbst kann die Geometrie auf Grund der Detailreduzierung im VR-System nicht ändern. Der CAD-Konstrukteur muss dem VR-Designer dann die neue Geometrie zuleiten, die dieser für neue Analysen in das VR-Programm integriert. Dieses Vorgehen ist so lange zu wiederholen, bis keine Unklarheiten oder funktionalen Probleme mehr bestehen. Videosequenzen der VR-Animationen sind dabei ein geeignetes Mittel, die erkannten Probleme dem CAD-Konstrukteur visuell darzustellen. **Bild 3** zeigt schematisch diese Iterationen zwischen dem CAD-Konstrukteur und dem VR-Designer.



**Bild 3:** Problem der Iterationszyklen zwischen dem CAD-Konstrukteur und dem VR-Designer, nach /1/

#### 5 Feature basiertes Konzept eines Entwicklungsprozesses

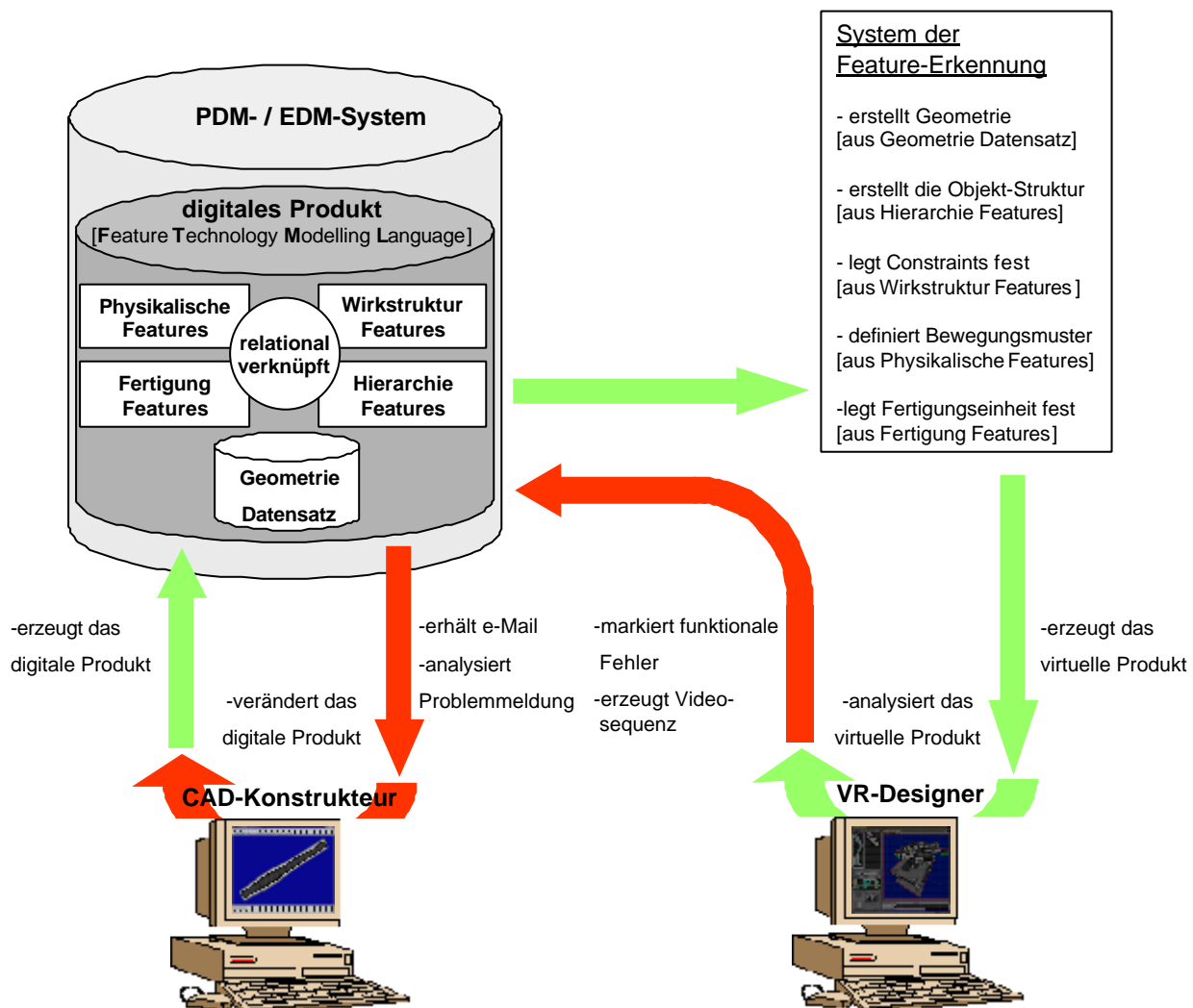
In der VDI-Richtlinie 2218 /3/ ist das Feature definiert als informationstechnisches Element, das Bereiche eines Produkts von besonderem technischem Interesse darstellt. Es ist eine bestimmte Sichtweise auf die Produktbeschreibung in Zusammenhang mit Eigenschaftsklassen und Pro-

duktlebenszyklen. Das Feature ist damit die Relation zwischen den Produktdaten während des Produktlebens.

Im Gegensatz zu üblichen Konzepten der Feature-Technologie, bei der die Feature-Informationen wie Fertigungsdaten, Werkstoffdaten etc. mit der CAD-Geometrie verknüpft werden, stellt das hier vorgestellte Konzept nach /1/ das Feature an sich an den Anfang der Entwicklungskette. Das Ziel ist das vollständige virtuelle digitale Produkt von der Planung bis zur endgültigen Verwertung. Die CAD-Zeichnung oder -Geometrie ist dann nur ein Detail-Feature des gesamten Produktmodells. Durch Definition der Datenformate z.B. STEP und das relationale Zusammenwirken entsteht eine Art Feature Technology Modelling Language (FTML), die mit Hilfe von Editoren mit PDM/EDM-, CAD- und VR-Systemen Daten austauschen kann, wie **Bild 4** zeigt.

## 6 Potenzial des Feature-Konzepts

In **Bild 4** wird außerdem die neue Vorgehensweise der Kommunikation zwischen dem VR-Designer und dem CAD-Konstrukteur dargestellt. Es zeigt nicht nur den Aufbau des VR-Modells basierend auf Feature-Daten des digitalen Produkts zusammen mit Geometrie-Informationen aus dem CAD-Programm, sondern auch die verbesserte Rückkopplung zwischen VR und CAD. Erkennt der VR-Designer bei seinen Analysen ein Funktionsproblem z.B. die Kollision zweier Bauteile, dann kann er die Bauteile in dem virtuellen Produktmodell markieren und eine Videosequenz erzeugen. Durch Relationen in dem digitalen Modell ist der CAD-Konstrukteur dieser Geometrie bekannt und ihm wird ein Bericht mit Visualisierung des Problems über E-Mail mit Video-Attachement zugestellt. Er kann dann entscheiden, ob eine Änderung des Bewegungsmusters oder der Geometrien durchgeführt wird. Nach Abschluss der Änderungen sendet er

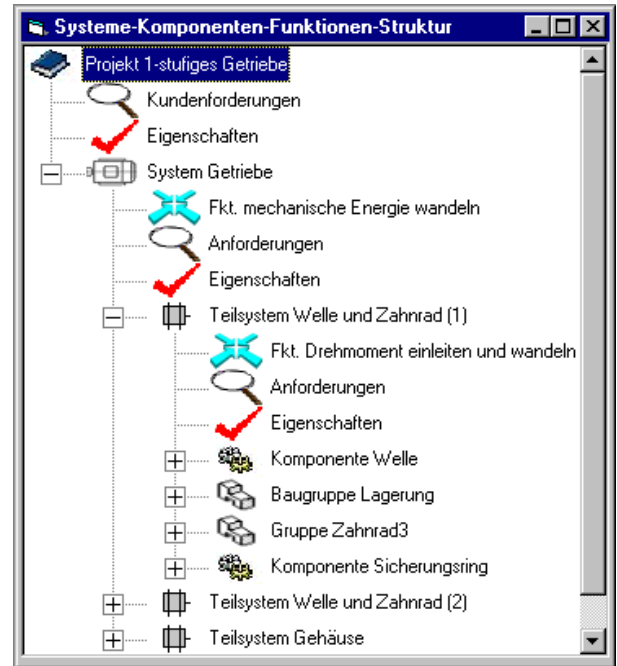


**Bild 4:** Die vom VR-Designer benötigten Informationen werden dem digitalen Produkt als Feature-Daten durch Editoren entnommen. Eventuelle funktionale Probleme des Produkts werden vom VR-Designer erkannt und in Zusammenarbeit mit dem CAD-Konstrukteur gelöst.

dem VR-Designer eine Meldung. Der VR-Designer führt eine überprüfende Analyse mit den neuen Daten durch. Diese Struktur der Rückkopplung ist genauso mit den Bereichen Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Montage aufzubauen. Die zu untersuchenden Kriterien sind dabei Fertigungs- und Montageverfahren und ihre optimalen Parameter. Dieses Konzept bringt den Unternehmen deutliche Einsparungen an Iterationen und damit Zeit und Kosten, lässt dem Entwicklungsprozess aber noch die Flexibilität für die Anforderungen des Marktes, weil es in bestehende Strukturen integrierbar ist.

## 7 Funktionalität eines wissensbasierten Informationssystems

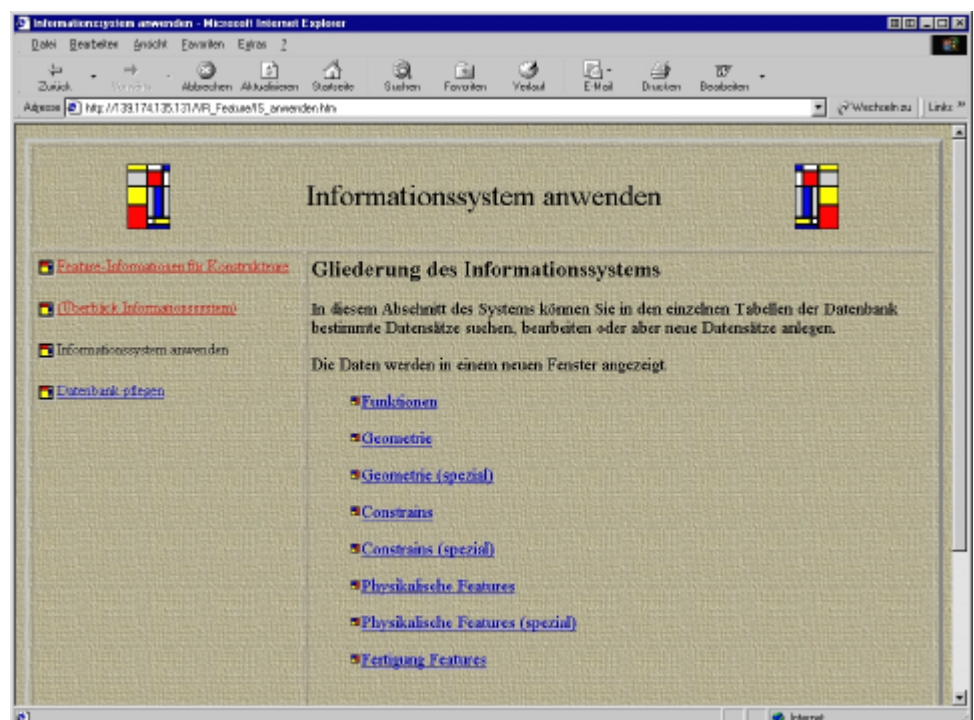
Nach der Analyse des Konstruktionsprozesses nach VDI 2221 /4/ wurden dessen Aktivitäten nach den Anforderungen des neuen Feature-Konzepts umgeordnet. Statt des größtenteils seriellen Tätigkeitsablaufs sollen dabei viele Aktivitäten parallel durchgeführt werden. Gerade die Tätigkeiten nach der Zuordnung einzelner Maschinenelemente zu den durch sie zu erfüllende Funktion(en) bietet durch den Einsatz von VirtualReality und anderen computergestützten Werkzeugen viel Potenzial für paralleles Arbeiten. Mit Auswahl des Maschinenelements werden viele weitere Eigenschaften wie Grundgeometrie, Kinematik, Freiheitsgrade, Bewegungsmuster und Fertigungsverfahren automatisch mitbestimmt. Für das Beispiel "Welle" sind das z.B. runder Grundkörper mit Stirnflächen, die Rotation um die Längsachse und das Fertigungsverfahren Drehen. Die Parameter der einzelnen Eigenschaften müssen dann nur noch weiter spezifiziert werden. Es liegt schließlich ein vollständiges, digitales Produktmodell vor, das eindeutig definiert ist und vom VR-Designer einschließlich der Fertigungsprozesse analysiert wird. Er kennzeichnet das endgültige Produktmodell im PPS- oder PDM-System dann als verifiziert.



**Bild 5:** Darstellung der Struktur des digitalen Produkts während der Entwicklung

## 8 Anwendung des Informationssystems am Beispiel Getriebekonstruktion

An Hand der Konstruktion eines einstufigen Getriebes wird die Funktionalität des wissensbasierten Informationssystems erläutert: Als erstes werden die Funktionen des Konstruktionsobjekts als Struktur angelegt. Das Ergebnis zeigt **Bild 5**. Dabei werden Grundfunktionen z.B. Drehmoment einleiten und wandeln in Unterfunktionen aufgespalten und die Anforderungen z.B. Werte für Drehmomente und -



**Bild 6:** Abbildung einer Benutzeroberfläche des Informationssystems



drehzahlen den einzelnen Funktionen zugeordnet oder näher spezifiziert. Durch die Zuordnung der Funktion(en) zu den Maschinenelementen z.B. Wellen, Zahnräder, Lager mit den tatsächlich vorliegenden Eigenschaften der Bauelemente entsteht die in **Bild 5** abgebildete Gesamtstruktur des digitalen Produkts im Informationssystem.

Aus der Gliederung der Maschinenelemente wird bei der CAD-Konstruktion dann die Hierarchiestruktur des Objekts. Der Konstrukteur wird durch Suchalgorithmen in der Datenbank bei der Zuordnung der Informationen unterstützt. Eine Oberfläche des Informationssystems im Internet-Browser zeigt **Bild 6**. Mit Hilfe des Systems kann der Konstrukteur sich z.B. die geeigneten Maschinenelemente zur Funktionserfüllung anzeigen lassen, deren Eigenschaften er weiter spezifizieren kann, um schließlich die CAD-Geometrie mit Maßen, Toleranzen etc. anzulegen. Mit der Auswahl des Maschinenelements hat er auch die grundsätzlichen Wirkstrukturinformationen festgelegt, deren Parameterwerte er nur noch festlegen muss. Zusammen mit den physikalischen- und Fertigungs-Features ist das Konstruktionsobjekt Getriebe als digitales Produktmodell bestehend aus den Einzel-Features vollständig definiert. Der VR-Designer kann nun das Produktmodell mit einem VR-Programm im Hinblick auf Funktions-, Fertigungs- und Montagefehler analysieren. **Bild 7** zeigt eine Funktionsanalyse des Getriebes bei abgenommenem Gehäuse-

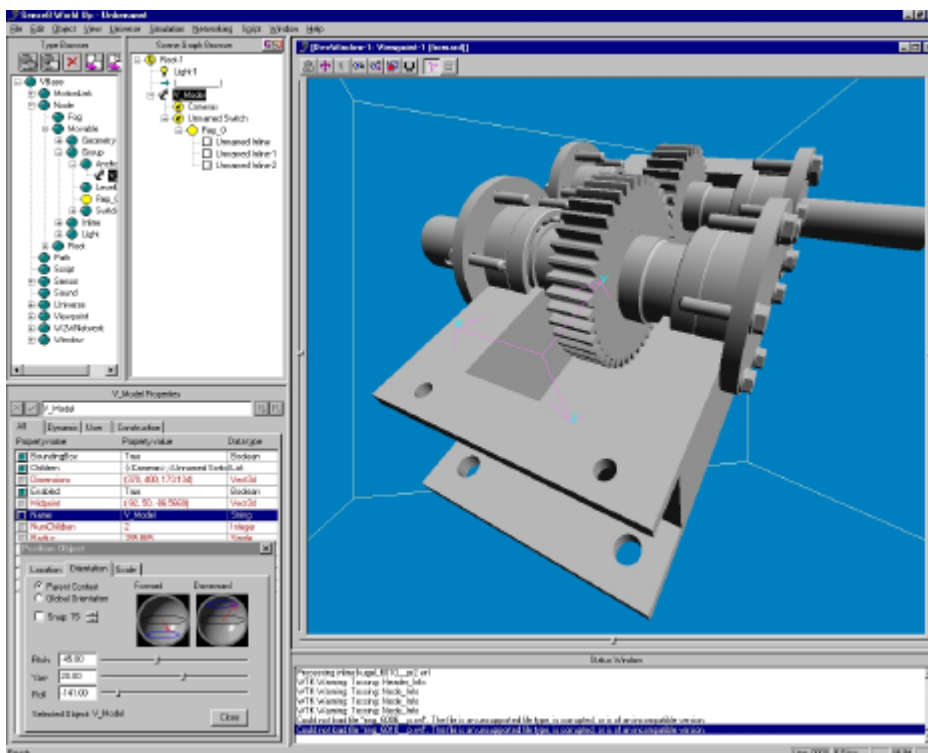
oberteil als Darstellung im VR-Programm. Sind keine Funktionsstörungen oder sonstige Fehler feststellbar werden die Produktdaten zur Fertigung freigegeben.

## 9 Zusammenfassung

Der Artikel zeigt die Anwendungsfelder für den Einsatz von VirtualReality-Software in der Entwicklung von technischen Produkten. Die Integration von VirtualReality als Entwicklungswerkzeug erfordert wegen der Datenreduzierung an den Programmschnittstellen zwischen den CAD- und VR-Systemen und des erhöhten Kommunikationsbedarfs der beteiligten Fachleute eine Neuorganisation der Entwicklungsaktivitäten und der Datenstrukturen. Dazu wird ein Konzept vorgestellt, bei dem die Strukturierung der Produktdaten auf Features basiert. Alle Features zusammen bilden das digitale Produkt. Anhand der Beispielkonstruktion eines Getriebes wird die Umsetzung des Konzepts mit dem rechnergestützten Informationssystem bestehend aus relationaler Datenbank mit Zugriff durch Internet-Browser, CAD- und VR-Programm erläutert.

## 10 Literatur

- /1/ Storch, S.: Strategisches Re-Engineering des Produktentstehungsprozesses basierend auf einem Feature-Konzept unter besonderer Berücksichtigung der Virtualen Realität als Entwicklungswerkzeug; unveröffentlichte Diplomarbeit, IMW Clausthal (2000)
- /2/ Mechanical Engineering Center Ltd.
- /3/ VDI-Richtlinie 2218 (Entwurf): Feature-Technologie, Hrsg. von der VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Düsseldorf (1999)
- /4/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Hrsg. von der VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Düsseldorf (1993)



**Bild 7:** Desktop-Oberfläche des VR-Programms mit dem Getriebemodell

## Towards the emerging Systems Engineering data exchange standard – AP233

Düsing, C.

*Das europäische IST Projekt SEDRES-2 (Systems Engineering Data Representation and Exchange Standardisation – 2), das seit Januar 2000 durchgeführt wird, beschäftigt sich mit der Weiterführung der Entwicklung eines neuen Datenaustauschstandards basierend auf STEP (Standard for the Technical Exchange of Product Data, ISO-10303), welcher die Domäne des Systems Engineering unterstützt. Dieses Projekt ist der Nachfolger des SEDRES Projektes und der Aktivitäten innerhalb der ISO 10303 – STEP - AP233 "systems engineering data representation" Arbeitsgruppe. Das Hauptziel des Projektes ist es, das vorhandene Systems Engineering Informationsmodell auszubauen, zu validieren und zu standardisieren, sowie die praktische Implementation und die Anwendung in der industriellen Umgebung über viele Bereiche zu pflegen. Dieser Artikel faßt die Hauptaussagen, die Methodik und den Anwendungsbereich zusammen und erläutert die Bedeutung von AP233 für die Domäne des Systems Engineering.*

*In January 2000 the European IST project SEDRES-2 (Systems Engineering Data Representation and Exchange Standardisation - 2) started in order to go on to continue the production of a neutral data exchange standard based on STEP (Standard for the Technical Exchange of Product Data, ISO-10303) supporting the Systems Engineering (SE) domain. This project is a follow on of the SEDRES project and the ongoing activities within the framework of ISO 10303 – STEP - AP233 "systems engineering data representation". The projects mission is to extend, validate and standardise the Systems Engineering data model and nurture its practical implementation and multi-sector exploitation as a key enabler for industry. This article describes the main objectives, the approach and the scope of SEDRES-2. It explains the importance of AP233 for the systems engineering domain.*

### 1 Introduction

Contemporary complex projects and their corresponding products are never produced by just a single company, but by many companies working together, either as partners, or within a complex

supply chain. The challenge is always to work together in a coordinated way. One of the significant methods to do this is Systems Engineering (SE), which can be defined as "An interdisciplinary collaborative approach to derive, evolve, and verify a life cycle balanced system solution that satisfies customer expectations and meets public acceptability" [7] within this context. A lot of the projects using this discipline are mainly located in the area of aeronautics, and aerospace industry like the Eurofighter 2000 or the Ariane 5 project, but it will also be applicable to other domains like transport systems, telecommunications, civil engineering etc. as the tunnel link project shows us. These were all projects in which systems engineering has been playing a significant role. The size and the complexity of these projects leads to a significant number of partners and therefore in fact to a much larger number of current systems engineering and design tools used on any one project.

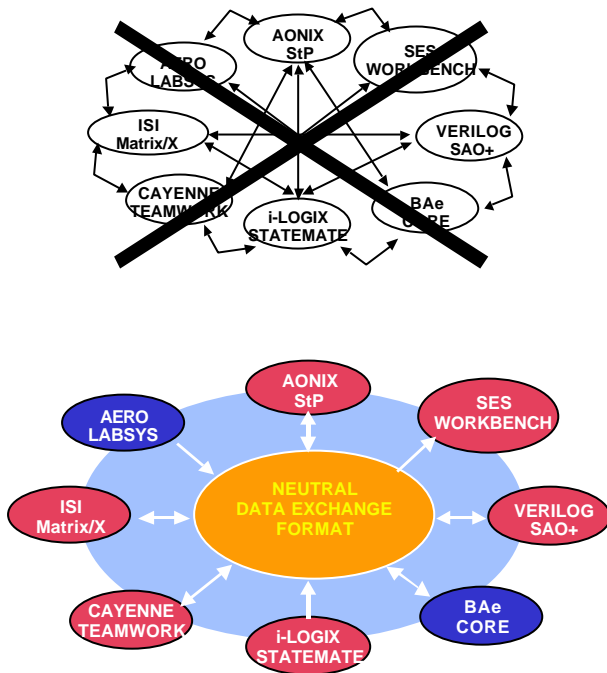
This leads usually to distinct problems with the exchange of data between all the different tools used in the systems engineering process. These tools are not limited to special system engineering tools, but also to other tools which are used within the process, i.e. control engineering, structural engineering, electrical engineering, power- and hydraulics- distribution and generation tools. It is so far indispensable to improve the interoperability between on one hand SE-tools themselves and on the other hand between SE-tools and engineering tools in order to reduce time and costs and increase quality of the system engineering process.

The relation with the solution of this problem and the SEDRES-2 project will be presented in this paper. The main objectives of the project will be described and illustrated as well as the interrelationship with the AP233 (systems engineering) working group at ISO level. An overview of the current status of the data model will be given and a more detailed view of the SEDRES-2 project work will be presented.



## 2 The benefits of a neutral data exchange

In order to improve the interoperability between different system engineering design tools a set of different tool to tool interfaces could be one solution to this problem. On the other hand, a standards based approach to the exchange of design information has some more advantages for the organisations, that use a set of multiple design tools in the systems engineering process as well as for the tool vendors.



**Figure 1** The difference between tool-to-tool exchange and a standards based exchange (the given tools represent the ones which were used in the SEDRES-1 scenarios)

Tool vendors can easily use the standard to develop their interfaces which will then be compliant with other interfaces. **Figure 1** illustrates the advantages of the standards based exchange of design data. In fact we have a number of  $N(N-1)$  interfaces in the upper part of the figure and a number of  $2N$  interfaces when using the standards based exchange as shown in the lower part of figure 1. Usually all these interfaces have to be developed and maintained by the tool vendors. In our example eight different tools were used, which means that in the first case 56 interfaces have to be developed and maintained in opposition to the standards based approach where there are just 16 possible interfaces. Of course, not all combinations

are either required or necessary. Practical considerations in addition increases the number of interfaces also with the number of operating systems and their derivatives. It helps also to improve the quality of interfaces and consequently the interoperability of tools, because a lot of errors in the interface - development can be avoided, as there is a smaller number of interfaces to be build. Also the structure of the interfaces is well prepared and fixed in the standard, so that every tool vendor has the same baseline for his development, which increases the interoperability of the interfaces themselves. The big advantage for the users in a systems engineering design environment is the flexibility in the use of a system. There are more advantages in too. The standard enables the storage of systems engineering data in tool neutral format, considering that a lot of the systems we are talking about have particularly more than 40 years of lifetime. Additionally you will get the possibility to pull parts of design information from multiple tools, so that you can perform consistency checking of the data. Furthermore it gives you the possibility to create views on the data which are not supported by a single tool. There is the possibility to store the data of different tools in a central data repository, which could for instance include automatic consistency checking and other features.

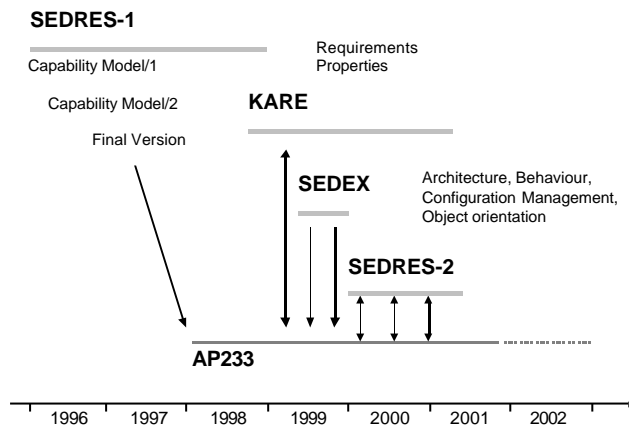
The next section explains the interrelationship between the original SEDRES-1 project and the ongoing AP233 and SEDRES-2 activities within the standard development process.

## 3 The standard development activities

The European Commission co-funded project 20496 'SEDRES', running from 1996 to March 1999, has made significant progress in producing a neutral data exchange standard based on STEP /8/ embracing systems engineering design data. The achievements of this project after it's completion in 1999 were:

- Production of three increasingly mature data exchange information models. These are known as Capability/1, Capability/2 and Final Proposal as shown in Figure 3 and are used as a kind of baseline in the AP233 working group for the data model development, which is illustrated in **Figure 2**.
- Production of prototype interfaces for several different COTS (Commercial off the Shelf) tools used in systems engineering.

- Kick off of a healthy and vibrant standardisation activity within the ISO STEP community /8/ following a successful international ballot at the end of 1997 with a YES-vote from twelve countries.



**Figure 2** Interrelationship between AP233 and different projects

The ISO AP233 working group used the original SEDRES-1 data models and extended the model further during 1999. The main contributions during this period were two-fold. From the European research project 28916 KARE, there were contributions mostly in the area of the requirements UoF (Unit of Functionality). From the SEDEX project performed at the Linköping University (Sweden), contributions were in the areas of system architecture, functional behaviour, configuration management and object oriented analysis UoF's. The main objective was not to extend the scope of the AP233 data model, but to improve and mature the capabilities of the data model itself /10/. In the following section the data model and its single UoF's will be described and illustrated in more detail. An overview about the AP233 information modelling philosophy will be given.

#### 4 The data model: evolution and status

The first information model, which was Capability/1 from the SEDRES-1 project (shown in **Figure 3**) in 1996 covered a small subset of the systems engineering domain. The intention was to support data exchange of functional models with a limited capability of supporting requirements management. The second version of the data model (capability/2) extended the scope in the areas of behavioral design, configuration management, and the support for graphics.

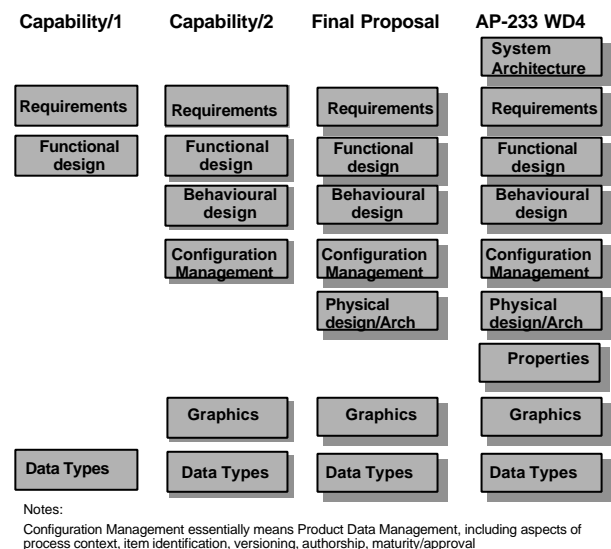
The final version of the data model developed within SEDRES-1 contained further information

about physical aspects of a system as well as entities for tracing decisions on how functionality is allocated to physical components of a system. The final data model from SEDRES-1 is described in more detail in /9/.

The contents of all above mentioned UoF's are summarized beneath:

**Systems architecture** - provides an entity to represent the system (or systems), to which other model elements can be related. It also covers relationships between systems, as well as definition of lifecycle, mode or stakeholder views on a system.

**Requirements** - covers essentially structured or unstructured statements about what a systems product shall comply with, be they functional, architectural, operational aspects or system properties (safety or legislative requirements, performance, cost, etc.); justification information; support for defining relationships among requirements (for instance, to distinguish *original* and *derived* requirements). There is also support for tracing requirements to functional and physical elements of a specification.



**Figure 3** Evolution and elements of SEDRES data model

**Functional** - comprises entities to model the system functions, functional refinement (functional hierarchy), flows between functions, and the functional context.

**Behaviour** - embraces detailed timing, sequencing and event-based behaviour. These include: data driven behaviour specifications; finite state machine concepts; a procedural or functional chain approach; a synchronous behavioural model. A 'black box' or 'stimulus-response' form is also being con-

sidered for AP-233. Many references (for instance, Ward & Mellor 1985, Hatley & Pirbhai, 1988, Oliver et al 1997) illustrate several of the concepts covered in the Functional and Behavioural areas.

**Configuration Management** - covers the concepts needed to manage and control the different design items, including: authorship and ownership, authorisation, work management, development process reference, item versions, product variants, item maturity through the product's lifecycle. This is building on work in other areas of STEP data exchange development, for instance, the agreement on the Product Data Management (PDM) Schema.

**Graphics (Visual presentation)** - covers concepts such as diagram object shape, connections, and placement within the diagram. This is to support transfer of the visual layout of notations used in SE such as: data flow diagrams, statecharts, functional flow block diagrams.

**Properties** – covers representation of numerical defined calculated, assessed or measured attributes of systems, physical elements or functions. Examples include cost, weight and execution time.

**Physical Architecture** - covers a simple node-&-link type approach for capturing architectures, where the node-elements and connect-elements are instantiated to deal with the different technology elements. This will enable the functional analysis and trade-off activities to be supported within Integrated Product Teams across multiple design tools. This generic approach enables the data model to support physical component topologies (interconnections without details of physical placement) for a variety of basic technologies including: computing; electrical; hydraulic; pneumatic; mechanical; and potentially hybrid technologies such as electrical-mechanic, and electro-optic.

**Data Types** – includes: strings, dates, bound and unbound number types, strings, compound data types or aggregations. Bound numbers are numbers which are constrained to a particular range, for instance Day-of-Month [1..31]. Where possible this area will be aligned with the existing data type building blocks available within the existing STEP architecture.

The AP233 data model development continued afterwards in conjunction with the Swedish SEDEX project. The main focus of this project was to address identified weakness and issues and not to extend the model further. Additionally a model was developed, which shows how object oriented systems engineering and analysis can be implemented in the information model.

systems engineering and analysis can be implemented in the information model.

The current version of the data model, which is WD4 (working draft 4) covers all the aspects mentioned above and shown in figure 3 in the right column labelled AP233-WD4. Over the time a lot of requirements for the data model development have been added. Sources for requirements are for example the AP233 WG itself, the SEDRES-2 consortium, the INCOSE (International Council on Systems Engineering), the NASA/JPL other industrial companies etc.. These requirements are going to be evaluated, prioritised, and checked if they are "in scope" within the SEDRES-2 project. If they are in scope they will be implemented in the data model.

The fact that the systems engineering domain itself and the tools used within this domain are very heterogeneous, implies that there is no consistent or total view of the capabilities that shall be supported by systems engineering design tools. Figure 4 shows a conceptual view of the AP-233 information model in UML notation. The main groups of the model are: System architecture, specification elements, requirement and functional allocation, engineering process and support information.

The relationships between the groups are outlined below (see **Figure 4**). The elements of the Engineering process group can be used to capture the systems engineering process for a project and relate Specification elements and System architecture information to the process phase they were created/referenced in. Specification elements provide the structures to define requirements, functional and physical architecture of systems represented by elements of the System architecture group. The support information group provides information that can be applied to elements in the other groups. The model is structured such that there are no existence dependencies on entities involved in relationships between the groups, i.e., entities are used to represent the relationship. More detailed information about the data modelling strategy can be found in /6/.

## 5 The scope of the SEDRES-2 project

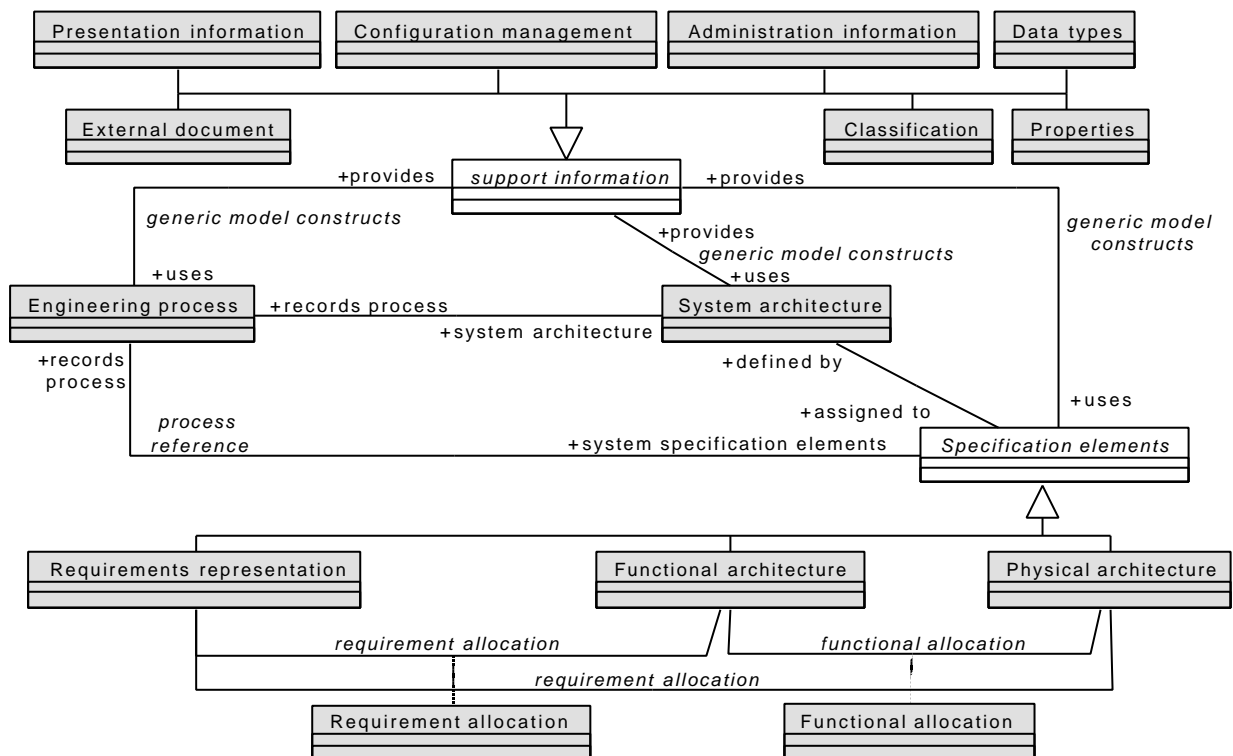
The goal of SEDRES-2 is set against the ultimate concept of achieving a distributed environment supporting systems engineering, building on the results of SEDRES-1 and in complement to the AP233 activities.

Therefore the top-level objectives of the project are defined as:

- To drive the on-going AP-233 activity in the areas of data modelling, test material, document preparation, to ensure that European interests are represented in the emerging systems engineering data exchange standard;
- To validate the standard by performing practical case study definition, prototyping, use and evaluation of the emerging standard within real SE activities;
- To achieve the adoption ("take-up") of AP-233 by all stakeholders, by maximising the two-way dialogue between the first two tracks of work, and between SEDRES-2 and such stakeholders, and to ensure that the vision of generic systems engineering is appropriately supported by the emerging standard.

- investigation on implementing design repositories instead of simple data exchange will be done.

An action *SEDRES.network* will be started with the main objective to manage the evolution of the AP233 standard across various stakeholders. It will ensure the cross-sector cohesion of the emerging AP233 data exchange standard, such that the standard fully supports the generic nature of systems engineering as practised across industry sectors. The *SEDRES.network* will enable you to influence the development of the standard, because it gives you the possibility to share your opinion with the project consortium of SEDRES-2. Furthermore, as a member of *SEDRES.network*, you will be kept regularly informed on events, progress and results of the project and the standardisation status.



**Figure 4** Conceptual view of the information model

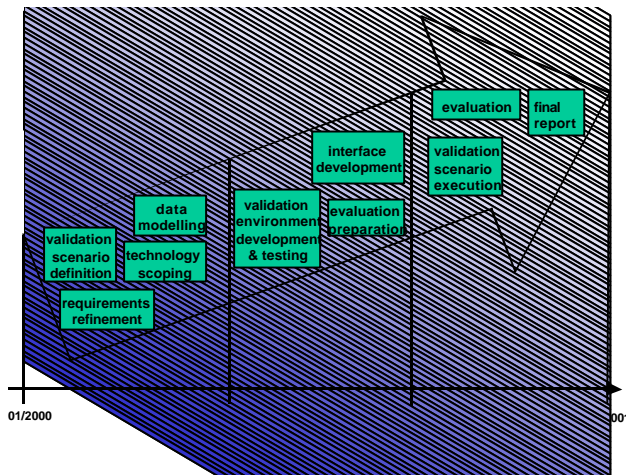
The main aspects of the current project are so far that

- the work is complementary and supportive of AP233.
- the data model developed in the SEDRES-1 project and the ISO activities will be extended and validated
- an extended set of prototype tool interfaces will be developed

More information about the *SEDRES.network* is available directly at the SEDRES homepage (<http://www.sedres.com>).

The eighteen months project, which started in January 2000 consists mainly of three different phases, which are illustrated in **Figure 5**. Within the project two validation scenarios are defined, which drive the actual modelling activities and are intended to improve the quality of the information model in an industrial driven context. Both of the

validation scenarios are driven by the philosophy to ensure that the refined requirements of the information model can be related to a real situation and that a mechanism exists to perform a meaningful evaluation. The data modelling work will refine existing work and extend it with new elements, which are defined earlier. Interfaces will be produced during prototyping activities for a set of different systems engineering tools.



**Figure 5** timescale and related content of the SEDRES-2 project

The focussing on the technical issues of data models for communication between different types of tools in the systems engineering domain leads to reduced attention on issues like human and business factors involved. In fact these factors have implications on the functioning working style of people and companies in which they work. Therefore the evaluation will especially be build in the user-system evaluation area. There will be an investigation on the implications of business effectiveness with respect to team working and business life factors. The evaluation process, which is currently in the definition phase will be performed during the application of the validation scenarios.

## 6 Summary

This article has presented the need for neutral data exchange standard within the systems engineering domain. It illustrated the work which has been done in several projects and activities until now and how they will fit together. The modeling philosophy and the current status of the actual systems engineering information model have been described in some detail. Finally, the objectives and the approach of the follow-on project SEDRES-2 have been explained.

## 7 References

- /1/ Aslasken, E. & Belcher, R.: Systems Engineering, Prentice Hall of Australia Pty. Ltd., 1992
- /2/ Düsing, C., Goltz, M., Heimannsfeld, K.: SEDRES-2 Systems Engineering Data Representation and Exchange Standardisation 2, Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal Nr.24, 1999
- /3/ Hatley, D.J., Pirbhai, I.A.: Strategies for Real-Time System Specification, Dorset House Publishing, 1988
- /4/ Heimannsfeld, K, Judith, M.: KARE Knowledge acquisition and Sharing for Requirement Engineering, Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal Nr.24, 1998
- /5/ Herzog, E. & Törne, A.: Towards a Standardised Systems Engineering Information Model, INCOSE, 1999
- /6/ Herzog, E.: AP-233 Information Modelling Philosophy, internal working paper of the SEDRES-2 project, 2000
- /7/ IEEE 1220-1994: IEEE Trial-Use Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process, IEEE Computer Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers, February 28, 1995
- /8/ ISO, ISO 10303-1, Industrial automation systems and integration - Product Data Representation and Exchange - Part 1: Overview and fundamental principles, 1994
- /9/ Johnson, J.F.E., et al.: The Future Systems Engineering Data Exchange Standard AP-233; Sharing the results of the SEDRES Project, INCOSE, 1999
- /10/ Johnson, J.F.E., Barbeau, S., Herzog, E., Giblin, M.: The Maturing Systems Engineering Data Exchange Standard AP-233 & Your Role, Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual Symposium of the International Council on Systems Engineering, Minneapolis, 2000.
- /11/ Oliver, D. W., Kelliher, T. P., Keegan Jr., J. G.: Engineering Complex Systems with Models and Objects, McGraw-Hill, 1997
- /12/ Ward, P.T., Mellor, S.J.: Structured Development for Real-Time systems, Yourdon Press, 1985

## CAD-Schnittstellen: wenn dem Konstrukteur mehr abgeschnitten wird, als ihm lieb ist

Käferstein, B.

*Die Zahl der Anwendungen zur Unterstützung des Simultaneous Engineering Prozesses nimmt stetig zu und damit auch die Zahl der Schnittstellen. Es ist daher wichtig, genormte Formate zu haben, die einen sicheren und qualitativ hochwertigen Datenaustausch gewährleisten. Im 3D-CAD Praktikum mit dem System SolidWorks wird deshalb näher auf diese Problematik eingegangen.*

*The number of software systems to support the simultaneous engineering process is steadily increasing like the number of the necessary software interfaces. Thus it's very important to use standard exchange formats to ensure a safe and high quality data transfer. In the 3D-CAD SolidWorks training at the IMW students are encouraged to improve their practical skills in the use of software interfaces.*

### 1 Testbeschreibung

Die geeignete Schnittstelle ist, wie im richtigen Leben, die Grundlage für eine gute Kommunikation. Sie kann durch folgende Ursachen gestört sein,

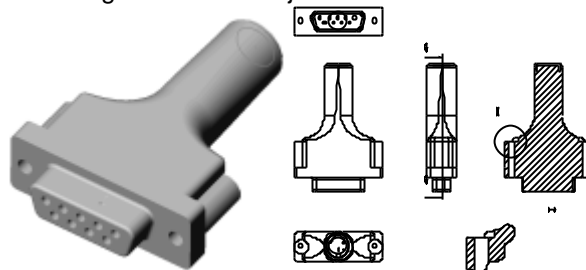
**Tabelle 1:**

Homo Sapiens	Mikroprozessorsystem
<b>Physikalische Störung (Übertragungsebene)</b>	
zu laut/leise, unter Wasser, kein Medium, Dämpfung zu hoch, Reflexionen, Echos ⇒ Verstärker, Filter, Hörgerät, Megafon, Gehörschutz	andere Rechnerplattform, Zeichen-/Bitcode nicht identisch, Datenträgerformat, Takt ⇒ Protokollumsetzer, Konvertierer für Zeichenketten
<b>Grammatikalische Störung (Formatierungsebene)</b>	
Wortreihenfolge, Kausalitätsbeziehung, Deklination ⇒ Aufstellen und Anwenden von allgemeinen, eindeutigen Regeln und Ausnahmeregeln	Reihenfolge, Trenn-, Steuerzeichenzeichenvorgabe ⇒ Umordnen der Formate, Schnittstellenkonvertierer
<b>Semantische Störung (Bedeutungsebene)</b>	
Begriffsbildung: „Was stellt sich der andere unter .... vor“ ⇒ Lexikon, Nachfragen, von jemand anderen umschreiben lassen	z.B. bilden Koordinaten im CAD-Progr. Punktwolken ab, in FEM-Progr. aber die Ecken von Quaderelementen ⇒ Interaktive und „intelligente“ Filter

**Tabelle 1:** Mögliche Kommunikationsstörungen

Während sich Menschen aufgrund ihrer hohen Flexibilität mit etwas Aufwand zur Not noch mit Händen und Füßen verständigen können, scheitert das bei Rechnerschnittstellen an der fehlenden Intelligenz und Interpolationsfähigkeit. Rechner sind starr auf bestehende Formate fixiert.

Es wurde unter SolidWorks ein einfaches Bauteil, **Bild 1**, modelliert und mit den jeweils zur Verfügung stehenden Schnittstellen aus SolidWorks exportiert. Zusätzlich wurde eine vereinfachte technische Zeichnung als 2D-Testobjekt erstellt.



**Bild 1:** RS-232 Stecker als Testbauteil

Als Konfiguration für den Export wurde weitestgehend auf die vordefinierten Standardeinstellungen zurückgegriffen. Eingelesen wurde zurück nach SolidWorks, nach Pro/Engineer (PTC, voll parametrisiertes 3D-CAD), nach Marc/Mentat (MARC, FEM Pre- und Postprozessor), nach Medusa (PTC, 2D-CAD-System) und nach MS-Word für die Berichterstellung. Der Rücklesetest in das ursprüngliche Programm zeigt meist recht eindrucksvoll, welche Taktik eine Firma verfolgt. Meist wird ein guter Import aber ein schlechter Export gewährleistet, um die Marktposition zu stärken. Eine einfache Übernahme von Fremddaten ist ein gutes Verkaufsargument. Um jedoch einen Systemwechsel zu erschweren ist der einfachste Weg, den Exportfilter nur rudimentär zu programmieren. FEM Pre- und Postprozessoren wie z.B. Mentat sind dagegen meist mit guten Schnittstellen in beiden Richtungen ausgestattet, da sie sich nur so rentabel einsetzen lassen. Die Ergebnisse eines separaten Tests mit AutoCAD (AutoDesk) sind nicht mit aufgelistet. Der Import von DXF- und DWG-Dateien war aber bis auf Probleme mit der Layerdarstellung und Skalierung zufriedenstellend.



Die Größe des SolidWorks Volumenmodells belief sich auf 0.28 Mbyte. Das Stereolithographieformat (\*.STL, Rasterung 1/50 mm) konnte von keinem der aufgelisteten Programme eingelesen werden, wurde aber von der Spritzgußsimulation 3D-QuickFill anstandslos erkannt. Die herstellerspezifischen Formate von Parasolid (\*.x\_t, \*.x\_b) dienen als nichtparametrisierte Export/Import Schnittstellen zum Parasolid 3D-Kernel, der auch von anderen Programmen verwendet wird. Die Ausgabe von Zeichnungen oder Ansichten auf einem Postscriptdrucker liefert nachträglich editierbare Vektorgraphiken. Als sehr interessant für den Web-Publishing Bereich hat sich die VRML Schnittstelle erwiesen (\*.vrl). Durch ein entsprechendes Plug-In (z.B. COSMO VR-Viewer) können die Teile in Netscape oder Internet-Explorer angesehen und gedreht werden, ohne SolidWorks installieren zu müssen.

## 2 Zusammenfassung

Insgesamt konnte die Durchgängigkeit und Zuverlässigkeit der Schnittstellen nicht überzeugen. Der Absturz einiger Programme beim Import ist nicht

tolerabel. Warnmeldungen, die auf drohenden Datenverlust hinweisen, sind nicht vorhanden. Bei den 2D-Schnittstellen werden Linienzüge teilweise unzulässig umgewandelt. Zum Beispiel wurde bei der Sequenz SolidWorks ⇨ DXF ⇨ SolidWorks ⇨ DXF festgestellt, dass Splinekurven beim Reimport in SolidWorks in Liniensegmente umgewandelt wurden. Wenn kein direkter Datenaustausch möglich ist, muss man teilweise über mehrere Zwischenschnittstellen gehen, die immer mit zusätzlichen Datenverlusten verbunden sind.

Die Schnittstellenproblematik bleibt also weiterhin aktuell und wird durch die Zunahme der Modellkomplexität ein entscheidender Kostenfaktor im betrieblichen Ablauf bleiben, der nicht unterschätzt werden darf. Aussagen wie „Dafür haben wir doch bei beiden Programmen eine XY-Schnittstelle– kein Problem die Daten zu transferieren. Sie machen das schon!“ sollten kritisch hinterfragt werden. Denn dabei wird gänzlich vergessen, welcher Datenverlust auftritt und wie groß der Personalaufwand wirklich ist.

Dateityp	MB	Solid-Works „Reimport“	Einlesen in Mentat	Medusa	Einlesen in Pro/E	MS-Word
STEEP *.stp	0,89	Ö Volumenklumpen aus Einzeloberflächen erzeugt, nur ein Feature; vollständig und bearbeitbar	-	-	Ö Volumenklumpen aus Einzeloberflächen erzeugt, nur ein Feature; vollständig und bearbeitbar	-
TIFF *.tif	2,86	Ö nur als Hintergrundbild	-	-		Ö als Pixelbild
VDAFS *.vda	4.69	Ö Volumenklumpen aus Einzeloberflächen erzeugt, nur ein Feature; vollständig und bearbeitbar	Ö sehr schlecht getrimmte Flächen, manuell nachzubessern, schneller Import	☹ Meldung Keine Lizenz	☹ Absturz ProE V20 ☹ Absturz ProE V19	-
IGES (Flächen) *.igs	1.04	Ö Volumenklumpen aus Einzeloberflächen erzeugt, nur ein Feature; vollständig und bearbeitbar	Ö Oberflächentrimmung besser als VDAFS, manuell nachzubessern	☹ erkennt nichts	Ö nur reine Oberflächen, kein Volumen, nicht zu bearbeiten, da Oberfläche nicht geschlossen	-
ACIS Volumenmodell *.sat	0.54	Ö Volumenklumpen aus Einzeloberflächen erzeugt, nur ein Feature; vollständig und bearbeitbar	Ö Elemente mit Länge 0 nicht erkannt, dauert sehr lange !	-	-	-
Autocad *.dxf (2D)  *.dwg (2D)	0.15  0.05	Ö im Part als einzelner Linienzug; als Drawing nicht editierbarer Linienzug; nur für Konturen geeignet	Ö problemloses einladen (ACAD R12-Format), keine Layer aber Punkte usw.	☹ Meldung falsche Version	Ö im Drawing-Modus, voll editierbar; DWG wird nicht angenommen	Ö einladbar und editierbar als Vektorgraphik

Testergebnisse: Ö eingeschränktes Ergebnis; - geht nicht; ☹ Absturz oder andere schwerwiegende Probleme

## Requirements Engineering Knowledge Management based on STEP AP233

Heimannsfeld, K.; Müller, D.

*Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojekts KARE - Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering - wird ein Ansatz für wissensbasiertes Anforderungsmanagement unter Einbeziehung des sich in Entwicklung befindlichen Standards für repräsentierende Systemdaten, ISO 10303-STEP AP233, entwickelt. Dieser Ansatz unterstützt den Prozess einer systematischen Umwandlung von natürlichsprachigen Anforderungen in eine modellbasierte Darstellung der Anforderungen. Mit diesem Ansatz sollen konsistente und vollständige Produktspezifikationen in kürzeren Zeiten und somit geringeren Kosten und einer verbesserten Qualität erzeugt werden können.*

*In the European research project KARE - Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering - an approach to knowledge-supported requirements engineering and the relation to the emerging standard for representing systems engineering data, ISO 10303-STEP AP233, is being developed. The approach features the systematic transformation from natural language requirements into a model-based representation of requirements. The approach aims at producing consistent and complete product specifications in shorter times at substantially lower cost and with improved quality.*

### 1 Problem definition and introduction

More often developers of technical products are faced with customer requests for a specific product, product adaptation or an invitation-to-tender (ITT). The building of a competitive tender, which means a profit for customer and supplier, is a significant factor for the success of a company. For the supplier and customer of build-to-order or one-of-a-kind products, a competitive bid for a complex product requires a substantial amount of time and money. As the complexity of the product increases the complexity of preparing a bid grows exponentially.

The acquisition process is based on the requirements of need statements supplied by the acquiring organization or enterprise. Ambiguity, incompleteness and inconsistencies characterize these customer requirements. In the specific domain of one-

of-a-kind products like civil or military airplanes, train or transportation systems, the answering to a request, proposal or invitation-to-tender is a major cost factor. The development of a specification, on which a bid is based, is a time-consuming process with so far little automation support. Besides the cost of a bid itself, the cost for later rectification of inconsistencies and incompleteness of the initial specification will lead to significant higher costs later.

The ultimate goal is the reduction of the product definition time needed to prepare a bid and to increase the quality of the resulting specification by using model based product requirements, enterprise knowledge and inter-/intranet distributed engineering environments.

### 2 Requirements engineering knowledge approach

A vast amount of literature deals with the domain of knowledge engineering and management. It is not the aim of this paper to give an introduction. We will rather rely and describe the well-established facts. The knowledge engineering models can generally be categorised into three levels /5/:

- Domain knowledge
- Inference knowledge
- Task knowledge

The **domain knowledge** describes the main static information and knowledge objects in an application domain. It contains the structural information of a domain. From a STEP perspective all application protocols provide domain specific knowledge. Inside the KARE project, two parts are differentiated. First, there is the requirements engineering domain knowledge that is needed to represent requirements. The second part is the enterprise domain knowledge that is used to support knowledge functions operating on requirements engineering domain knowledge.

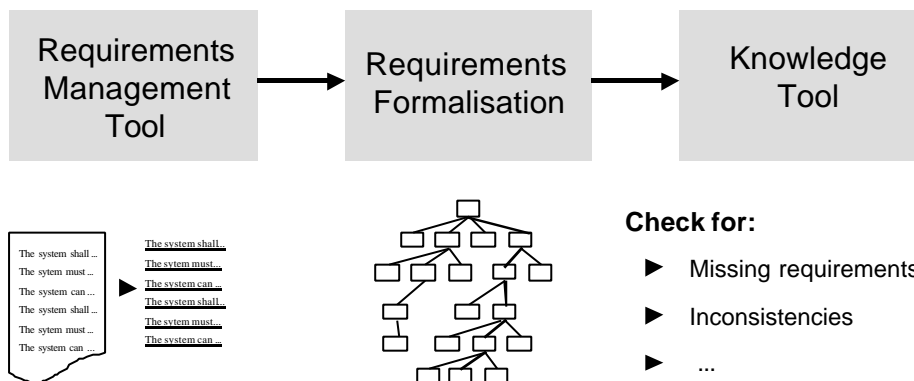
**Inference knowledge** describes how the static structures of the domain knowledge can be used to carry out a reasoning process. The category of the **task knowledge** supports the way to achieve goals by applying knowledge.



In KARE, the inference knowledge and the task knowledge are encapsulated in a specific knowledge management tool.

The main goal of KARE is the development of a requirement engineering process that is supported by knowledge. This places several requirements on requirements and knowledge engineering tools:

- The requirements domain knowledge must be semantically defined
- The enterprise domain knowledge must also be semantically defined
- The enterprise domain knowledge types must be extensible
- The knowledge functions encapsulating inference and task knowledge must also be extensible



**Figure 1:** The requirements formalisation process in a conceptual view

To define the requirements domain knowledge, EXPRESS and the related STEP methodology was chosen. The resulting EXPRESS model, the KARE requirements model, was adapted and incorporated into current ongoing work developing the systems engineering exchange standard AP233 on ISO level /1,2,3/. The AP233 model features a model-based representation of requirements. This model-based representation of requirements allows the application of knowledge functions. A major problem today is that most requirements are specified in natural language. Section 3 describes how KARE resolves the problem by transforming natural language requirement statements into a model-based representation of AP233.

Based on the knowledge tool selected for the pilot implementation of the KARE workbench no choice has been made yet in regards to the enterprise domain model. However, it seems natural to adapt EXPRESS as a description language also for this type of knowledge. This would also facilitate the re-use of already existing application protocols as en-

terprise domain knowledge models and therefore reduce the time needed for knowledge acquisition, analysis and customisation in some relevant domains like shipbuilding, civil and chemical engineering.

### 3 Requirements formalisation

The specification of requirements in natural text is one of the main reasons for ambiguity and inconsistencies. Approaches to express natural language requirements in models are therefore a current topic of research /9/.

The KARE project intends to promote the current acquisition practices from a mainly document based approach to a systems engineering model based approach that allows the electronic interchange of all necessary data in a distributed engineering environment.

The transformation of natural language requirement statements into a model-based representation of AP233 is named requirements formalisation. In this formalisation process, every requirement is being evaluated step by step in a systematic way. This will be realised by the requirements formalisation tool *demanda II*,

which is developed within KARE. The single sequences of the whole formalisation process are illustrated in Figure 1.

#### 3.1 Natural language requirements

Natural language representation is the initial form of defining a requirements statement. Documents with a specification of requirements are the basis for the formalisation process. They include every kind of information linked with the product. If the specifications are only available in paper form they have either to be scanned or have to be treated manually beforehand.

The documents are managed and handled within the requirements management tool DOORS<sup>TM</sup> on the level of natural language sentences. DOORS<sup>TM</sup> is used to provide typical requirements management functionality like configuration, change proposal and traceability management. For an extensive discussion of requirements management functionality, see /7,8/.

### 3.2 The requirements formalisation process

Each requirements statement specified in natural text is transformed into a system model description that represents the same information. This is done by identifying the four elements of a system specification as defined in AP233. These are the physical architecture, functions, behaviour and properties of a system.

In the following, we intend to give a brief description of the requirements formalisation process. The process is divided into three steps.

The lexical and syntactical analysis converts a sequence of characters in an ordered set of symbols and identifies the different parts of the speech. It also provides the hierarchical phrase structure of the sentences. As natural language permits ambiguity in respect to the phrase structure of a sentence, the user may have to resolve the ambiguity manually (Example: *The pupil saw the man with the telescope*).

The second step, word analysis, identifies the meaning of the different symbols in respect to the AP233 model. In other words, symbols describing a conceptual component from the physical architecture, a function, the behaviour or a property of the system are identified and defined.

As last step, the phrase analysis captures the relationships between the identified symbols. Possible relationships are hierarchy of components, interfaces between components and other relationships between components, functions and behaviour as specified in the requirements.

The content of the resulting model is of course not more correct or complete in its quality as the natural language requirements. However, the model offers the possibility to check by rules automatically on inconsistencies, missing or incorrect requirements. As an example, all system functionality can be checked for the existence of input/output specification. Of course, an existing specification does not indicate that it is correct, but a missing input/output indicates that further work is required.

### 4 The architecture of AP233

ISO 10303-STEP AP233 /1,2,3/ is an international standard for the computer-interpretable representation and exchange of systems engineering data. The objective is to provide a neutral mechanism capable of describing systems engineering data. The information exchange takes place in two directions. Horizontally the information is exchanged

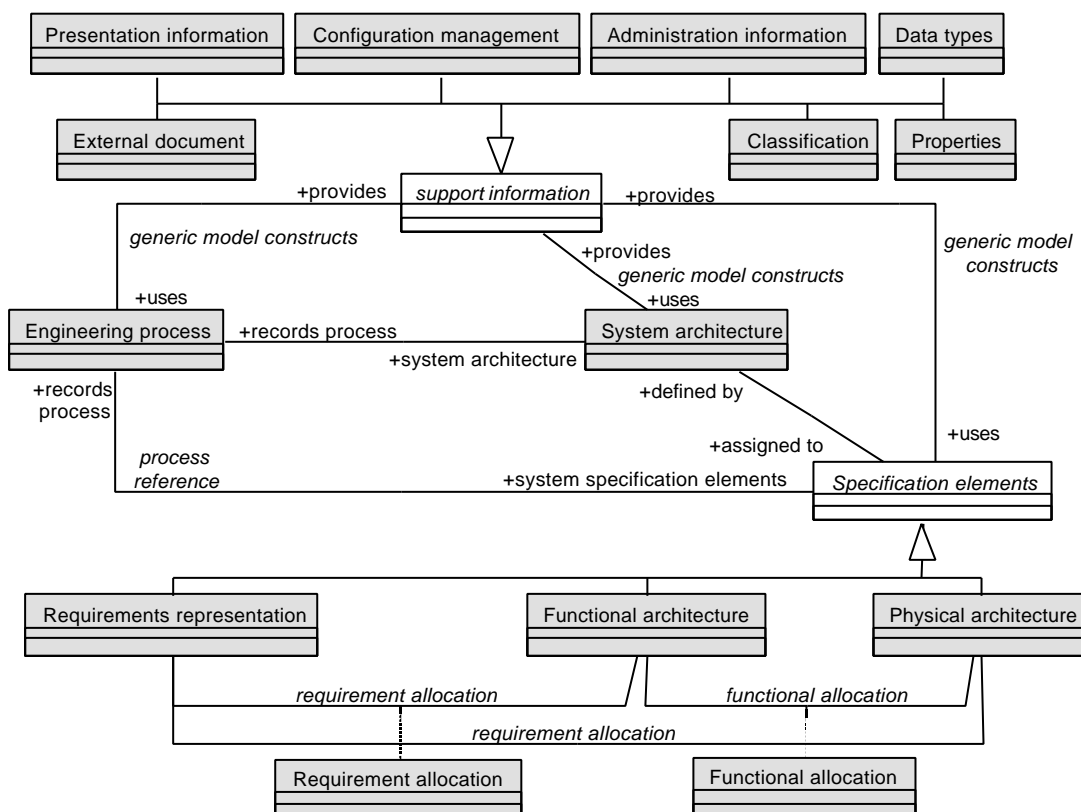


Figure 2: Conceptual view of AP233 as described in /4/

between system engineering tools. Vertically information is passed into lower tiers engineering domains (i.e. mechanical design, thermal design and engineering analysis) to create preliminary designs to support trade-off decisions at the systems engineering level. The application protocol defines the context, scope and information requirements for various development stages during the design of a system. The application protocol is applicable to any form of systems, such as an aircraft. The following is within the scope of the systems engineering application protocol AP233:

- Products with conformity to the concept of a system
- System definition data and configuration control data pertaining to the design and the validation phases of a system's development
- Requirements
- Functional analysis data including functional behaviour specifications
- Physical architecture and synthesis data providing a high level view on the system under specification
- Elements that are used to represent and trace requirements and the allocation of functions

#### 4.1 Units of Functionality

Below, the Units of Functionality (UoF) belonging to the system model AP233 are summarised:

- System architecture
- Requirements
- Functional design
- Behavioural design
- Data Types
- Physical design / architecture
- Properties
- Graphics
- Configuration Management

Figure 2 shows a conceptual view of the AP233 system model in UML syntax. Every box represents a group of related entities. Respective to /4/ the system model's main groups are:

**System architecture** – representation of the building blocks for covering all information valid for a system, partial view of a system or system interface. There is also support for representing the system of systems structure.

**Specification elements** - defining the basic building blocks for representing requirements, functional and physical architecture.

**Requirement and functional allocation** - defining the mechanisms for tracing requirements to functions (including behaviour), as well as physical architecture elements and functional architecture elements to physical architecture elements.

**Engineering process** - covering the building blocks for activities in the engineering process, and associating specification information to related activities.

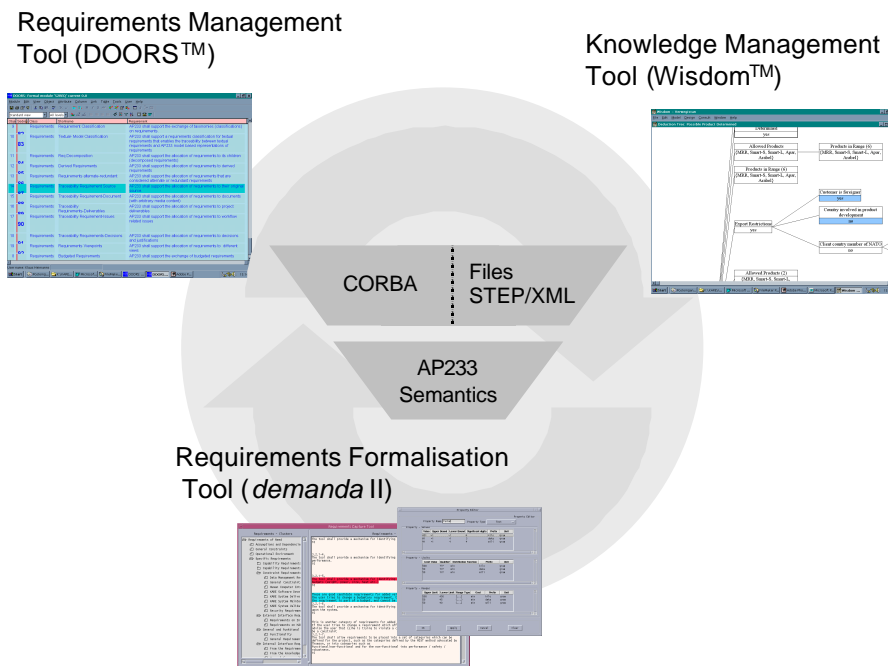
**Support information** - representing the building blocks for representing supplemental systems engineering information. This large group is composed of groups for representing configuration management information, visual layout information, mechanisms for referencing external documents, administrative information, data types and properties.

#### 5 The KARE workbench architecture

The KARE workbench is a set of tools to support the requirements engineering, formalisation and management process on the acquirer and the supplier side. It consists of three main tools that are connected by different alternatives of interfaces. The workbench consists of a requirements management tool, a requirements formalisation tool and a knowledge management tool. Figure 3 shows the general architecture of the KARE workbench.

To connect these tools a common semantic description of required information in the requirements engineering domain was developed. This semantic description was included in the emerging ISO 10303-STEP AP233 standard (AP233 systems engineering exchange standard). The interface implementations based on ISO 10303-STEP AP233 / Part 21 files (STEP physical files) is currently under development.

The implementation of the KARE workbench is starting initially with simple file exchanges and will mature later to a full-distributed knowledge supported requirements engineering workbench. The integration with available and established requirements engineering tools like DOORS<sup>TM</sup>, RDD-100<sup>TM</sup> or SLATE<sup>TM</sup> will initially be only supported by the file exchange interfaces. However, to allow a distributed working environment, it is foreseen that the respective tools are extended with CORBA interfaces to allow a tighter integration.



**Figure 3:** KARE Workbench components and architecture

A scaled-down application for users without requirements engineering legacy and Small or Medium Enterprises (SMEs) will be available as a stand-alone version of a PDM/EDM system. Underlying is a relational database schema based on parts of STEP AP233.

### 5.1 Requirements management tool

For the first prototype of the KARE workbench, the requirements management tool will be based on DOORS™ from Quality Systems & Software (QSS). DOORS™ will be adapted and extended as a client to both the knowledge management tool and the requirements formalisation tool.

Natural language requirements will be formalised in the requirements formalisation tool and passed back to DOORS™. Based on the formalised requirements the knowledge tool can detect missing, inconsistent or imprecise requirements.

### 5.2 Requirements formalisation tool

In KARE, the *demanda* requirements engineering tool /6/ will be adapted in order to support the formalisation requirements process. This adapted tool, named *demanda II*, will consist of a human computer interface that supports the requirement formalisation and a repository for formalised requirements.

The requirements formalisation tool includes different components to capture the requirements and to transform natural language requirements into an unambiguous, model based format. The requirements formalisation tool consists of the requirements capture & workflow, the requirements modeller and the requirements navigator. Underlying to all three modules is an AP233 repository.

The **requirements capture & workflow** tool contains the functionality to extract requirements from a customer or ac-

quirer specification document. The workflow part of the tool deals with the exchange of requirements, issues, conflicts and questions between supplier and acquirer.

The **requirements modeller** is a tool, which allows to create or manipulate requirements and to transform them onto a subset of the AP233 model. The modeller identifies ambiguous words and leads the user to phrase requirements in a way that they are unambiguous and tightly defined.

The **requirements navigator** is a tool to view and browse all requirements and related structural and behavioural information. It provides an overview of the requirements traceability links. External traceability links provide the possibility to capture the source and rationale of each requirement or the design elements that address and fulfil the requirements in later design stages. Internal traceability links support various forms of traceability related to the derivation of a final requirements baseline.

### 5.3 Knowledge management tool

The knowledge management tool captures and formalises enterprise knowledge in terms of previous cases, enterprise capabilities, and business objectives or measures. For the first pilot showing applicability of the KARE approach the knowledge is implemented using a system that is based on decision tables.

In KARE, the internal Arthur Andersen tool WISDOM<sup>TM</sup> is used as a demonstrator.

## 6 Conclusions

With the ongoing development of interfaces and tools within the KARE project it is too early to make a final résumé. However, from an implementation perspective a few lessons learned have been evolved.

The implementation of AP233 (ARM, /1/) into a commercial PDM system with an underlying relational database (ORACLE<sup>®</sup>) was a manual and therefore resource intensive task. The current development of the AP233 interface for the requirements formalisation tool *demanda II* follows proven technology originally adapted in the development of the *demanda* requirements engineering tool /6/. The implementation is based on the commercial STEP ECCO toolkit from PDTEC GmbH, Germany. The tight integration of ECCO with the Tcl/Tk language used for implementing *demanda* and *demanda II* eases the implementation effort drastically compared to a full C or C++ API implementation.

Further research will look into the possibility to automate the requirements formalisation process through the application of techniques adapted from computational linguistics. Requirements defined in natural language are normally based on a limited subset of that language. Therefore, it is expected that automation can be achieved for most parts of natural language specifications.

The development in KARE is directly connected to AP233. The current developments are based on working draft 4 of AP233. Due to the current AP modularization and interoperability projects, major changes of AP233 are expected.

Further information about KARE can be found under <http://www.kare.org/>.

The authors gratefully acknowledge the hard work of participants in the supporting projects KARE and SEDRES-1/2. The financial support from the European Commission for the KARE project (Esprit 28916) is also gratefully acknowledged.

## 7 Summary

This article described the basic principle and structure of the workbench prototype, developed within the European research project KARE. This workbench supports the process of knowledge-supported requirements engineering on supplier

side as well as on acquirer side. The representation of the requirements is based on the STEP AP233 data model. A formalisation process, supported by the workbench component *demanda II*, transforms the natural language defined requirements into a model-based representation.

## 8 Literature

- /1/ Ian McDonald: ISO TC184/SC4 N911: Application Reference Model for the Exchange of System Engineering Data, ISO TC184/SC4 document, 2000
- /2/ K. Heimannsfeld, H. Frisch: ISO TC184/SC4 N908: Application Protocol: System Engineering: Requirements for a data exchange facility, ISO TC184/SC4 document, 2000
- /3/ Sylvain Barbeau: ISO TC184/SC4 N910: System Engineering: Application Activity Model, ISO TC184/SC4 document, 2000
- /4/ Erik Herzog: AP233 Information Modelling Philosophy, internal working paper of the SEDRES-2 project, 2000
- /5/ A. Th. Schreiber...[et al.]: Knowledge Engineering and Management: the CommonKADS methodology, The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 2000
- /6/ A. Große, K. Heimannsfeld: Wissensbasierte Störfall- und Fehleranalyse bei der Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen, Institutsmitteilung Nr. 21, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, 1996
- /7/ G. Kotonya, I. Sommerville: Requirements Engineering - Processes and Techniques, John Wiley, Worldwide Series in Computer, 1997
- /8/ Karl E. Wiegers: Software Requirements, Microsoft Press, Redmond, 1999
- /9/ J. Dallner, A. Günther, C. Rupp: Die Erstellung eines Objektmodells aus natürlichsprachlichen Beschreibungen - Regelbasierte Identifikation von Modellelementen und Requirement-Patterns zur Konstruktion von modellierbaren Anforderungen in natürlicher Sprache, SOPHIST GmbH, 1999

# Entwicklung eines Informationssystems für präventive Sicherheitsanalysen an Maschinen und Anlagen

Beisheim, N.

*Die Entwicklung neuer Maschinen und Anlagen basiert größtenteils auf dem Erfahrungswissen von bereits realisierten Konstruktionen. Um die dabei gemachten Erfahrungen bei der Neukonstruktion verwendet zu können, müssen diese in geeigneter Form strukturiert, gespeichert und aufbereitet werden. Der Artikel beschreibt ein System zur Verknüpfung der Informationen aus dem Entwicklungsprozess, der Sicherheitsanalyse und der Simulation von verfahrenstechnischen Anlagen. Mit diesem Informationssystem können präventive begleitende Sicherheitsanalysen während der Entwicklung neuer Anlagen durchgeführt werden.*

*The engineering process of new machines and systems is mainly the result of experiences from constructions, which have been made some time before. The experiences and their data have to be managed and saved in a useful structure to get the needed information at the right time. This paper shows a knowledge based system to deal with information from the engineering process, the hazard analysis and the simulation of process machinery. With this knowledge based system it is possible to make preventive hazard analysis in the engineering process of new plants.*

## 1 Einleitung

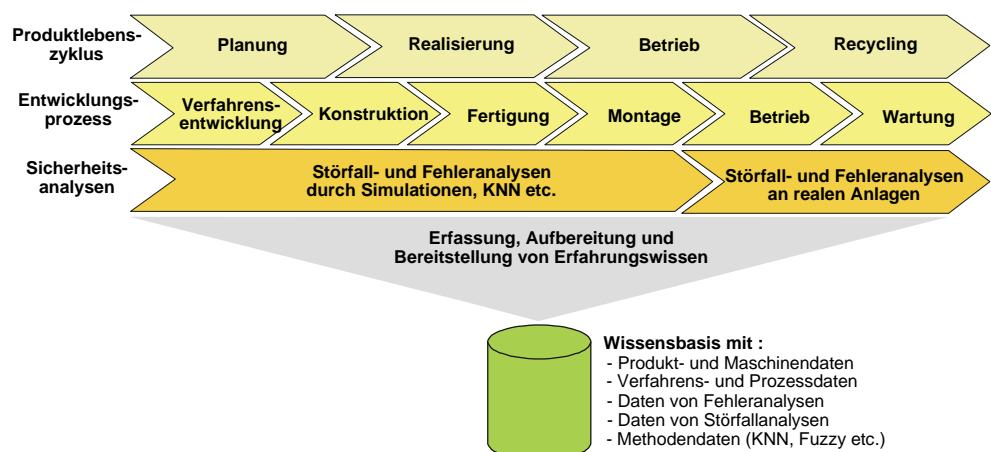
Die Komplexität der zu entwickelnden Systeme, Komponenten und Anlagen hat in der Vergangenheit stetig zugenommen und wird auch in der Zukunft weiter ansteigen. Die Ingenieure und Techniker greifen deshalb bei der Entwicklung neuer Systeme weitgehend auf ihr Erfahrungswissen zurück. Dieses Erfahrungswissen soll aber nicht nur die Informationen zum Zeitpunkt der Planung und Entwicklung beinhalten

sondern alle Phasen des Produktlebenszykluses umfassen, also auch Fertigung, Montage, Betrieb etc. Während aller Lebensphasen fallen große Mengen an Informationen an, die für neue Konstruktionen von Interesse sein können.

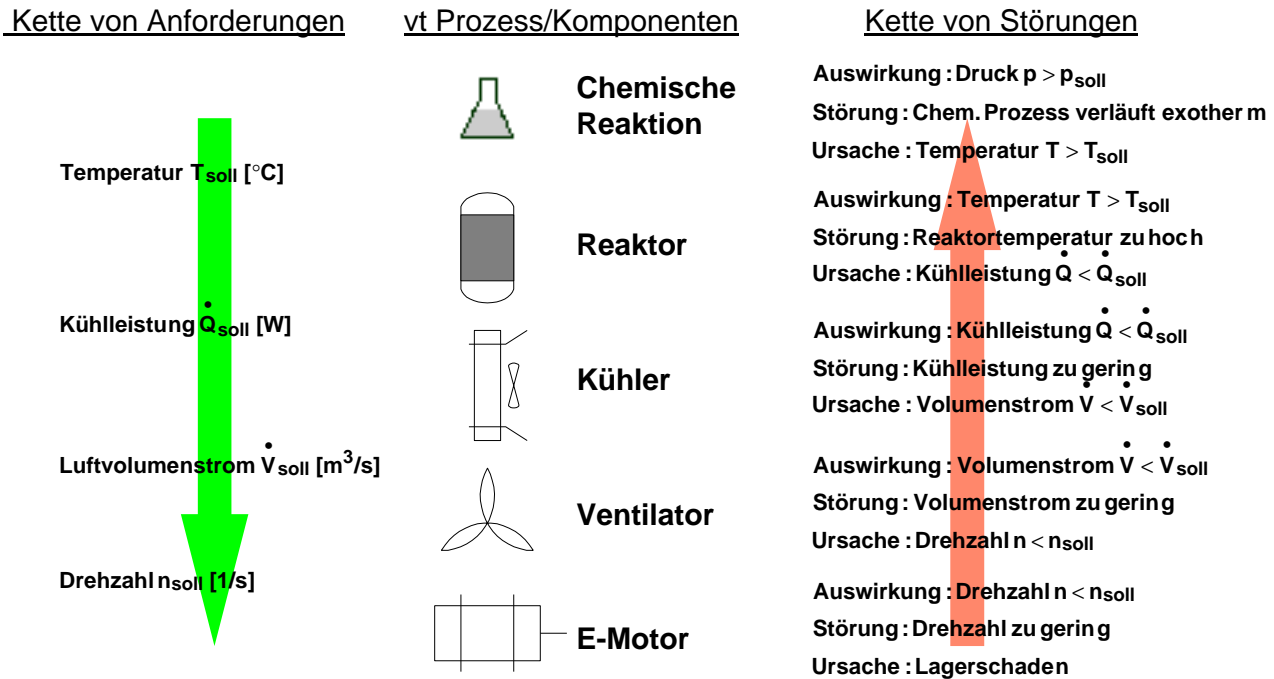
Die Aufgabe besteht nun darin, diese Informationen so zu strukturieren, zu speichern und aufzubereiten, dass sie bei der Neukonstruktion effizient wiederverwendet werden können.

## 2 Konzept

Das in dem Teilprojekt A2 des SFB 180 entwickelte Konzept der "**W**issensbasierten **S**icherheitsanalyse (WISI)" hat zum Ziel, die Schwachpunkte der im Rahmen des Projekts untersuchten Sicherheitsanalysen im Bereich Verfahrenstechnik und Maschinenbau zu verringern und die Vorteile der Methoden in einem Informationssystem zusammenzufassen. Dieses Informationssystem soll letztendlich alle Produktlebensphasen von der Entwicklung, Fertigung, Montage, Betrieb, Wartung bis zum Recycling eines Entwicklungsobjekts begleiten. Die dabei entstehenden Informationen sollen den in den Entwicklungsprozess integrierten sicherheitstechnischen Analysen übergeben werden, um deren Ergebnisse in den nachfolgenden Phasen zu berücksichtigen, wie in **Bild 1** dargestellt.



**Bild 1:** Daten- und Informationsfluss zur Wissensbasis während der Produktlebensphasen einer verfahrenstechnischen Anlage oder Maschine



**Bild 2:** Kette von Störungen basierend auf der Struktur der Komponenten und ihrer Anforderungen

## 2.1 Funktions-Anforderungsstruktur

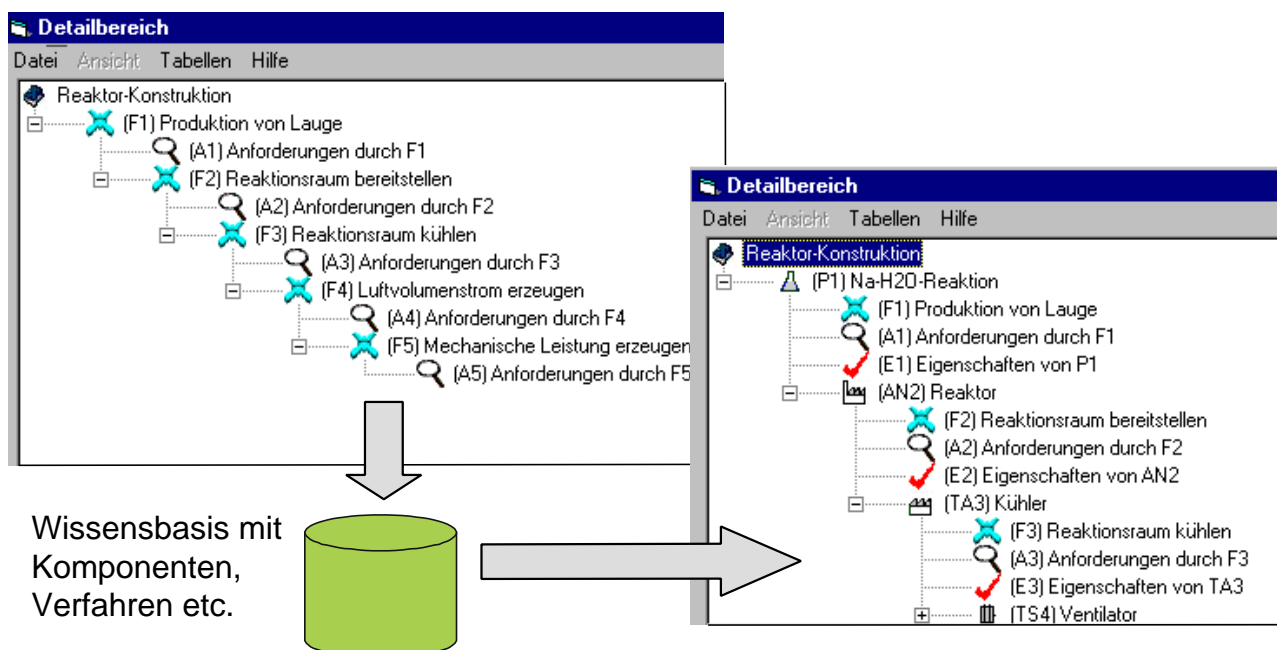
Das hier vorgestellte Konzept der Sicherheitsanalyse WISI beruht auf folgendem Zusammenhang /1/:

*"Störungen sind Zustände, bei denen die Eigenschaften einer Komponente oder Anlage die an sie gestellten Anforderungen nicht erfüllen."*

Denn so wie es eine Verbindung zwischen den Anforderungen der einzelnen Komponenten einer Anlage gibt, so gibt es auch einen Zusammenhang zwischen Störungen der Komponenten untereinander, wie **Bild 2** für einen Anwendungsfall zeigt: Es

soll eine Lauge mit bestimmter Konzentration erzeugt werden. Die dabei stattfindende chemische Reaktion ist exotherm. Damit die Temperatur im Reaktor konstant bleibt, muss dieser von einem Kühler gekühlt werden. Der Kühler hat einen Ventilator, der mit einem E-Motor angetrieben wird.

Um nun das Konzept der Sicherheitsanalyse in einem wissensbasierten Informationssystem umzusetzen, werden die bei der Entwicklung von verfahrenstechnischen Systemen anfallenden Anforderungen systematisch erfasst, dokumentiert und gespeichert. Sie bilden die Grundlage der Sicher-



**Bild 3:** Aufbau der Struktur der Komponenten und ihrer Eigenschaften, Funktionen und Anforderungen



heitsanalyse und werden deshalb zusammen mit den Funktionen als erstes in dem Informationssystem WISI festgehalten. Es entsteht eine Kette von Funktionen und Anforderungen wie sie in **Bild 3** (linker Bereich) dargestellt ist.

## 2.2 Erweiterung der Struktur mit Anlagen, Komponenten und ihren Eigenschaften

Die Anforderungen stehen bei der Realisierung einer Anlage in Relation zu bestimmten Eigenschaften von Einzelkomponenten und Anlagenteilen. Deswegen ist es notwendig, neben den definierenden Anforderungen die resultierenden Eigenschaften der Komponenten, Anlagen und Baugruppen zu dokumentieren und in der Wissensbasis abzulegen. **Bild 3** (rechter Bereich) zeigt die sich daraus ergebende Informationsstruktur.

## 2.3 Zuordnung der Störungen, Ursachen, Auswirkungen und Maßnahmen

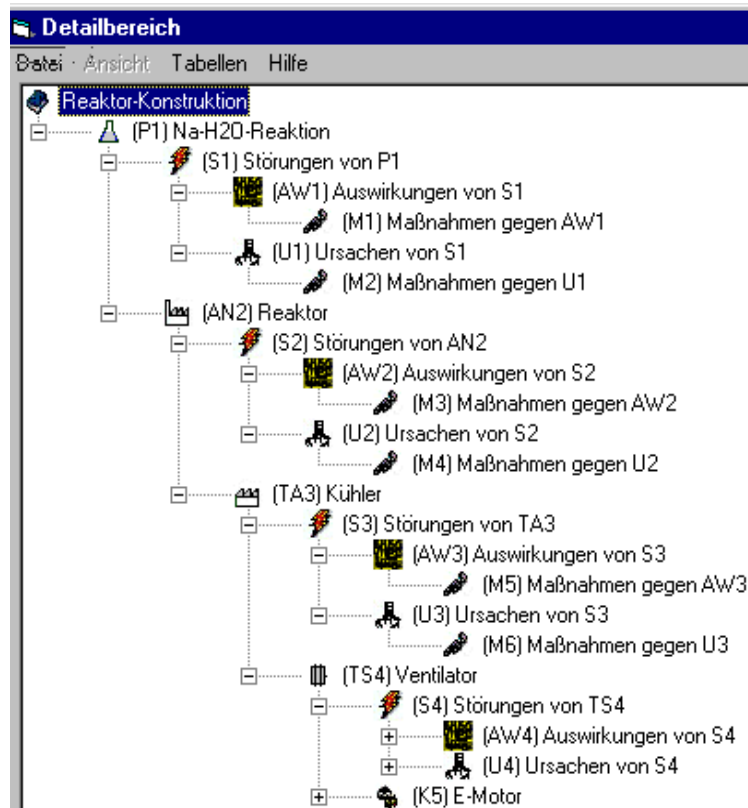
Durch Festlegen des Konstrukteurs auf Verfahren, Komponenten und deren Zuordnung zu Funktionen und Anforderungen sind auch die in der Datenbank gespeicherten Störungen und Fehler dieser Komponenten bestimmt, die in der bisherigen praktischen Verwendung des Verfahrens oder der Komponente aufgetreten sind. Die daraufhin durchgeführten Maßnahmen zur Beseitigung der Störung, sowie die Ursachen und Auswirkungen der Störung

sind durch das Wartungs- und Instandhaltungspersonal im Informationssystem zu erfassen. In einer späteren Entwicklung stehen diese Daten dann als Erfahrungswissen über bereits verwendete Komponenten, Anlagen und Prozesse im Informationssystem zur Verfügung.

Werden die Daten für die Verfahren, Anlagen und Komponenten aber zum ersten Mal angelegt, so sind jetzt mögliche Fehler und Störungen an Hand der im Informationssystem vorliegenden Anforderungen bzw. Funktionen und deren theoretisch möglichen Abweichungen zu ermitteln. Die Informationen sind im System dahingehend zu kennzeichnen, ob es sich um im Team **überlegte** Aktivitäten zur Vorbeugung von Störungen und zur Beseitigung von Störfällen handelt oder ob diese Maßnahmen bei Störfällen bereits realisierter Anlagen und Maschinen bereits **angewendet** wurden.

## 2.4 Methode einer Sicherheitsanalyse basierend auf der Semantik der Anforderungen

Um aus der Kette von Anforderungen und Eigenschaften eine Methode zur präventiven Analyse möglicher Fehlerquellen zu erhalten, müssen die Informationen von vorbeugend oder den nach einer Störung durchgeführten Störfall- und Fehleranalysen mit den bereits gespeicherten Entwicklungsdaten in der Wissensbasis verknüpft werden. Mit der Verknüpfung der Störungen an die Komponenten können die Auswirkungen der Störung der Komponente A als potentielle Ursachen für Störungen anderer Komponenten B, C, D über die vorliegende Komponentenstruktur untersucht werden. **Bild 4** zeigt einen Aufbau der Struktur zur Untersuchung komponentenübergreifender und interdisziplinärer Auswirkungen von Störungen zwischen chemischer Reaktion und physikalischen Komponenten. Für das Beispiel aus **Bild 2** ergibt sich durch Abweichungen von den Anforderungen folgende theoretische Störungskette, **Bild 4**: Durch einen Lager Schaden am E-Motor K5 als Ursache kommt es zu einer Verringerung des Luftvolumenstroms des Ventilators TS4 und somit einer Verringerung der Kühlleistung des Kühlers TA3. Dadurch steigt die Temperatur im Reaktor AN 2 und die chemische Reaktion P1 verläuft unkontrolliert exotherm.



**Bild 4:** Abbildung der Störungen, Ursachen, Auswirkungen und Maßnahmen im Informationssystem



## 2.5 Präventive Sicherheitsanalysen

Mit den vorliegenden Daten von bereits realisierten Anlagen können durch das Informationssystem präventive Sicherheitsanalysen mit hoher Zuverlässigkeit für neue Anlagen durchgeführt werden, obwohl diese noch in der Entwicklungsphase sind. Mit den im Informationssystem abgespeicherten Datenstrukturen von Komponenten, Anlagen etc. lassen sich Ursachen von Störungen simulieren. Die sich daraufhin ergebende Störungskette kann nach gefährlichen Auswirkungen durchsucht werden. Gegen die Ursachen oder Auswirkungen werden dann präventive Maßnahmen ergriffen.

Aufgrund des modularen Aufbaus ist das Informationssystem geeignet, interdisziplinäre Zusammenhänge zwischen einzelnen Fachbereichen wie Verfahrenstechnik und Maschinenbau nicht nur beim Entwicklungsprozess sondern auch bei der Sicherheitsanalyse zu berücksichtigen. Es ist dadurch möglich, Ursache-Störung-Auswirkung-Zusammenhänge über chemische Verfahren, physikalische Komponenten und softwaretechnische Programme hinweg zu untersuchen, wie bereits in **Bild 4** in der Störungskette zwischen chemischer Reaktion (Bezeichnung P1) und der physikalischer

Komponente Reaktor (AN2) gezeigt wurde.

In das Informationssystem wurden die Analysemethoden nach HAZOP "Hazard and Operability Study" (auch PAAG-Verfahren genannt) /4/ und FMEA "Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluß-Analyse" /5/ integriert.

Mit der HAZOP-Methode werden systematisch Gefahrenquellen durch Abweichung der Funktion einer Komponente von der Sollfunktion mit Hilfe von Leitworten in interdisziplinärer Teamarbeit ermittelt. Die potentielle Gefahr wird hinsichtlich ihrer Bedeutung bewertet und bei Relevanz werden Maßnahmen zur Risikominimierung ausgearbeitet.

Durch die FMEA-Analyse können die Störungen hinsichtlich ihres Risikos quantitativ beurteilt werden. Dazu werden die Kriterien "Bedeutung B" einer Auswirkung, "Entdeckungswahrscheinlichkeit E" einer Ursache und "Auftrittswahrscheinlichkeit A" einer Ursache mit einem Wert im Bereich von 1 bis 10 bewertet. Das Produkt der drei Einzelwerte ergibt dann die Risikoprioritätszahl  $RPZ = A \times B \times E$ . Je größer RPZ ist, desto höher ist das Risiko dieser Störung.

**Bild 5** (unterer Bereich) zeigt das Ergebnis der Si-

**Detailbereich**

Reaktor-Konstruktion

- (P1) NaH2O-Reaktion
  - (S1) Störungen von P1
    - (AW1) Auswirkungen von S1
    - (U1) Ursachen von S1
  - (AN2) Reaktor
    - (S2) Störungen von AN2
      - (AW2) Auswirkungen von S2
      - (U2) Ursachen von S2
    - (TA3) Kühler
      - (S3) Störungen von TA3
      - (TS4) Ventilator
        - (S4) Störungen von TS4
        - (K5) E-Motor

**Störung S2**

ID	Bezeichnung	StoerungFrage	Schluesel
2	Störungen von AN2	0	S2
7	Überschreiten der zulässigen Temperatur	2	S7
11	Überschreiten des zulässigen Druckes	2	S11
12	Leckage am Reaktor	7	S12
13	Überschreiten des zulässigen Stoffmassenstroms	2	S13
14	Überschreiten der zulässigen Laugenkonzentration	2	S14
15	Unterschreiten des zulässigen Stoffvolumenstroms	3	S15

**Ursache U2**

ID	Bezeichnung	Schluesel	Art
7	Kühlleistung Kühler TA3 $Q^{\circ} < Q^{\circ} \text{ (soll)}$	U7	9
12	Volumenstrom Wasser $V^{\circ} \text{ (ein)} < V^{\circ} \text{ (soll)}$	U12	9
13	Volumenstrom Wasser $V^{\circ} \text{ (aus)} < V^{\circ} \text{ (soll)}$	U13	8
14	Konzentration der Lauge	S14	13
15	Montagefehler an Stutzen	S15	5
16	Antrieb des Stofftransports zu schnell	S16	3
17	Pumpe defekt	S17	5
18	Ventil geschlossen	S18	3
19	Sensor für Konzentration ausgefallen	S19	6
20	Sensor für Druck im Reaktor ausgefallen	S20	6

**Sicherheitsanalyse**

ID: 1 Bezeichnung: Sicherheitsanalyse 1 gewählte Bedeutungs Grenze: 1 S. U. AW: ☐ Alle anzeigen ☒ Nur Ergebnisse Durchführen

Komponente: 2 Reaktor Sonstiges:  Analyse schließen

Störung: 2 Störungen von AN2

Auswirkung: 7 Temperatur  $T > T \text{ (soll)}$  Bedeutung: 6

Ursache: 7 Kühlleistung Kühler TA3  $Q^{\circ} < Q^{\circ} \text{ (soll)}$  Auftrittsw.: 7 Entdeck.: 9

Navigation:

**Bild 5:** Oberfläche des Informationssystems "Wissensbasierte Sicherheitsanalyse" (WISI)

cherheitsanalyse an der Struktur aus **Bild 2**, durchgeführt mit dem Informationssystem WISI. Dabei wurde die Ursache Lagerschaden einer Störung des E-Motors (K5) ausgelöst. Das Informationssystem ermittelt alle Störungen, Ursachen und Auswirkungen, die sich daraufhin bei den anderen Komponenten (TS4, TA3, AN2) und der chemischen Reaktion (P1) ergeben und zeigt sie an.

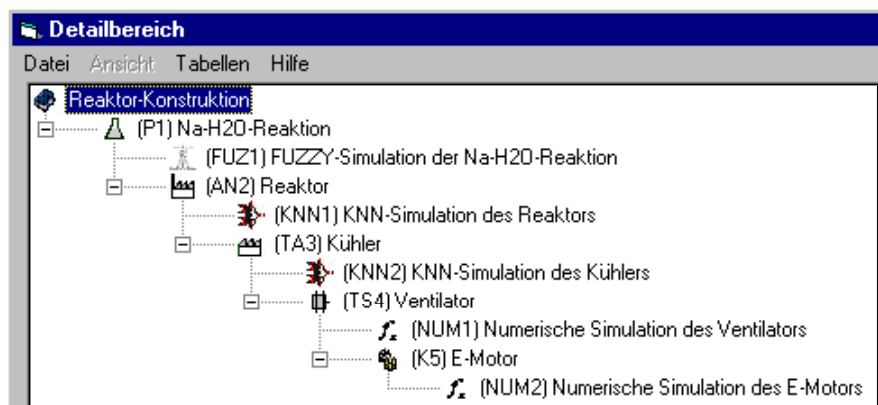
### 3 Integration von Simulationstechniken in das Informationssystem WISI

Um noch genauere Aussagen über Fehler- oder Störungspotentiale und ihre möglichen Auswirkungen gerade bei neuen Anlagen und ihren Prozessen zu machen, müssen die Prozessgrößen jeder Komponente im Betrieb mit dem zulässigen Wert der dazugehörigen Eigenschaft für diese Komponente verglichen werden. Wird dieser Vergleich an realen Anlagen durchgeführt, handelt es sich um eine Prozessüberwachung, die bei erkannten Abweichungen eine Störungsmeldung oder Gegenmaßnahme auslöst. Damit diese Analyse schon präventiv durchgeführt werden kann, muss ein Vergleich zwischen den zulässigen, in der Wissensbasis gespeicherten Werten und simulierten Prozessgrößen vorgenommen werden.

#### 3.1 Abbildung von Anlagen und Komponenten durch Simulationsmodelle

Zur Ermittlung dieser Werte sind Simulationsmodelle nötig, die das reale Verhalten der Anlage und ihrer Komponenten sehr genau abbilden. Werden diese Simulationsmodelle in den Regelkreis zwischen Operateuren und der realen Anlage eingefügt, so können die zu erwartenden Prozessgrößen aus den Stellgrößen vorherbestimmt werden. Die Überprüfung auf Prozesssicherheit kann dann an Hand der zulässigen Werte aus der Wissensbasis vorgenommen werden. Sollte das Informationssystem das Überschreiten der zulässigen Werte und damit das potentielle Auftreten von Störungen feststellen, kann es den Operateur darauf hinweisen und ihn zum Korrigieren der Stellgrößen auffordern bevor tatsächlich an der Anlage etwas verändert wird /2/.

Damit computergestützte Methoden wie Neuronale Netze, Fuzzy-Technologie und numerische Algorithmen in das Informationssystem "Wissensbasierte Sicherheitsanalyse" integriert werden können, ist die datenbanktechnische Zuordnung der einzelnen Methode zu der durch sie zu simulierenden Komponente in der Wissensbasis nötig /3/. Außerdem sind die für eine Abbildung ermittelten Methodenparameter dort zu speichern. Dabei ist die benötigte Genauigkeit einer Abbildung vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Auf diese Weise wird das Erfahrungswissen über das Betriebsverhalten von Prozessen und Anlagen im Informationssystem erfasst. Wegen der Relationen zwischen den Simulationsmethoden und einzelnen Komponenten stimmen die Ergebnisse einer präventiven Sicherheitsanalyse für eine neuzuentwickelnde Anlage, durchgeführt an ihrem Modell, mit hoher Wahrscheinlichkeit mit dem zukünftigen Verhalten der realen Anlage überein. Die Zuordnung einzelner Methoden zur jeweiligen Komponente zeigt **Bild 6**.

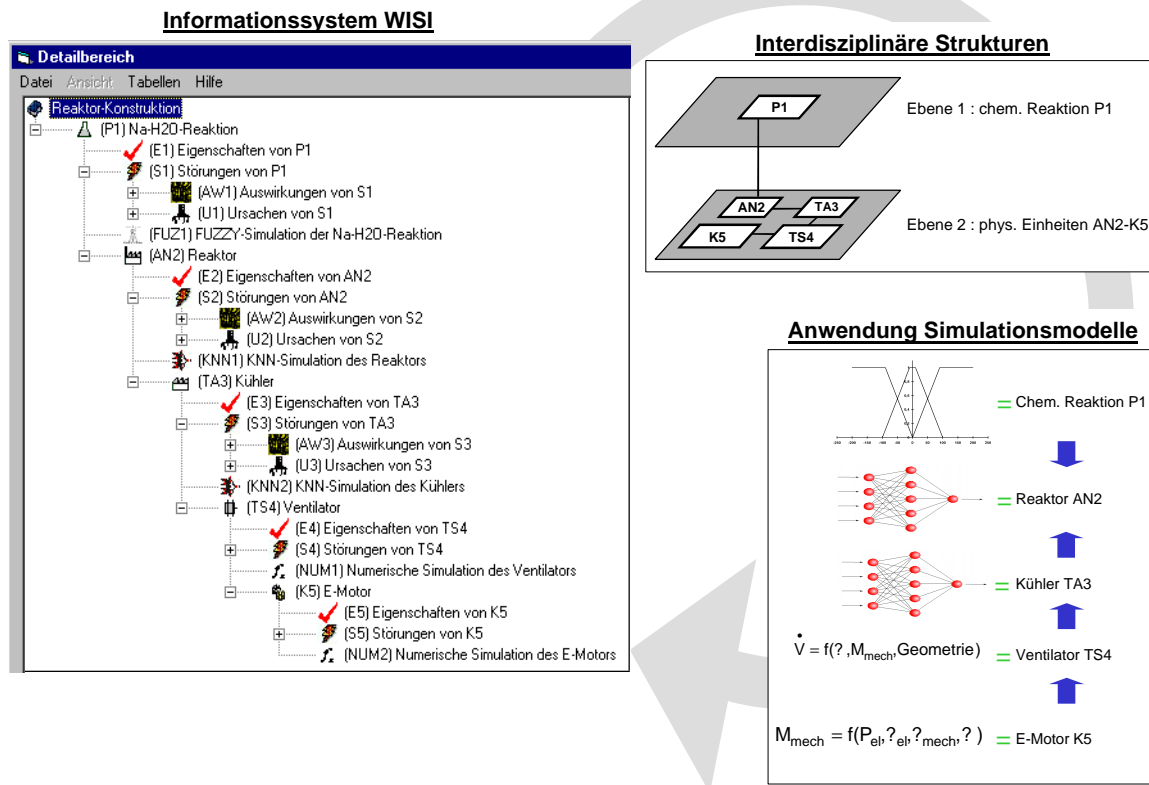


**Bild 6:** Integration der Simulationsmethoden in die Struktur des Informationssystems

Durch die Integration der Simulationsmethoden einzelner Komponenten können die Auswirkungen von angenommenen Fehlern quantifiziert werden. Die ermittelten Werte werden als neue Anforderungen mit den zugehörigen zulässigen Eigenschaften einer Komponente oder Anlage im Informationssystem verglichen. Bei Überschreiten von Eigenschaften sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen.

#### 3.2 Verknüpfung einzelner Simulationsmodelle zu einem Simulationsnetzwerk

Um nun eine Sicherheitsanalyse an einer ganzen Anlage durchzuführen, muss die Struktur ihrer physikalischen, energietechnischen, signaltechnischen und sonstigen Verbindungen der Komponenten innerhalb dieser Anlage erfasst sein. Dazu kann die



**Bild 7:** Untersuchung der Störungen an Hand der Komponentenstruktur und Simulationsmodelle

bereits im Entwicklungsprozess modellierte interdisziplinäre Struktur benutzt werden. Anhand dieser erkennt das Informationssystem, welche Datenobjekte miteinander in Verbindung stehen. In **Bild 7** ist schematisch eine solche interdisziplinäre Untersuchung an den Simulationsmodellen der einzelnen Objekte dargestellt.

#### 4 Zusammenfassung

Der Artikel beschreibt ein Informationssystem zur Erfassung, Speicherung und Aufbereitung von Informationen aus allen Produktlebensphasen von Maschinen und Anlagen. Dabei wird besonders auf die Bereiche Entwicklungsprozess, Simulationstechnik und Sicherheitsanalysen eingegangen. Das Informationssystem verknüpft die Daten aus einzelnen Fachbereichen des Entwicklungsprozesses von der Planung bis zur Stilllegung. Die erfassten Daten können nicht nur für einen optimalen Betrieb der Anlagen oder Maschinen hinsichtlich Sicherheit genutzt werden, sondern stehen auch bei der Neukonstruktion als Erfahrungswissen über bereits verwendete Verfahren, Prozesse, Teilanlagen und Komponenten zur Verfügung. Durch die zusätzliche Integration der Simulationstechnik in das Informationssystem wird der Entwicklungsprozess umfassend unterstützt und die Durchführung

von zuverlässigen, quantitativen und präventiven Sicherheitsanalysen ermöglicht.

#### 5 Literatur

- /1/ Dietz, P. (Hrsg.): Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen; Springer Verlag, Berlin 2000
- /2/ Beisheim, N.: Einsatz von neuronalen Netzen und Fuzzy-Technologie in der vorbeugenden Störfallsimulation; Institutsmittteilung Nr. 24, IMW Clausthal 1999
- /3/ Rosendahl, R.: Wissensbasierte Simulationstechnik bei verfahrenstechnischen Maschinen und Anlagen, Diplomarbeit am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, Clausthal 2000
- /4/ DIN IEC 56/581/CD: Leitfaden zur Gefährdungs- und Betriebbarkeitsuntersuchung (HAZOP) Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin 1998
- /5/ DIN 25448: Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluß-Analyse) Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin 1990

## Konstruktionsregeln für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung von Werkzeugen und Prototypen

Trenke, D.

*Die Qualität von lasergesinterten Metallteilen hängt im wesentlichen von der Rapid Tooling gerechten Konstruktion ab. Zwar haben auch die Genauigkeit der Anlage, die Wahl der Belichtungsparameter und Belichtungsstrategie, als auch das verwendete Metallpulver einen Einfluss auf das Prozessergebnis, jedoch variieren diese Faktoren nur in selten Fällen.*

*The quality of lasersintering metalparts depends essentially on the regular Rapid Tooling design. Admittedly has also the precision of the installation, the election of the exposureparameter and exposurestrategy, also as the used metalpowder an influence on the processresult, but however these factors vary only in rare cases.*

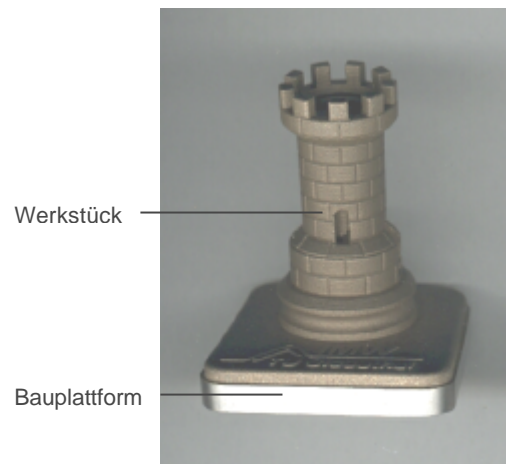
### 1 Grundlegende Konstruktionsregeln

Bei der Herstellung von Werkzeugen, Funktionsteilen und Prototypen durch Rapid Tooling sind verfahrensbedingt einige konstruktive Besonderheiten zu beachten. Die Einhaltung dieser Kriterien ist unbedingt erforderlich, um die Vorteile des Bauprozesses in seiner Gesamtheit nutzen zu können und eine möglichst hohe Prozessqualität zu erreichen.

#### 1.1 Geometrien

Wie bei den meisten generativen, schichtweisen Herstellverfahren ist auch beim direkten Metall Lasersintern (DMLS) nicht die Komplexität der Geometrie ausschlaggebend für die Herstellzeit, sondern das aufgebaute Volumen. Die Bauteile sollten daher sowohl in x-y-Richtung, als auch in z-Richtung, so klein wie möglich sein, um den Bauprozess kurz und damit kostengünstig zu gestalten. Um dies zu erreichen muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden, dass die Bauplattform als Teil des Werkstücks verwendet werden kann (siehe **Bild 1**). Der Lasersinterkörper wird dabei mit der Stahlplatte fest verbunden aufgebaut. Anschließend wird die Platte um den Körper herum zersägt und gefräst. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass die stabile Stahlplatte als Befestigung im Stammwerkzeug verwendet werden kann. Zudem wird

Bauzeit gespart, da das entsprechende Werkstückvolumen nicht mehr aufgebaut werden muss.

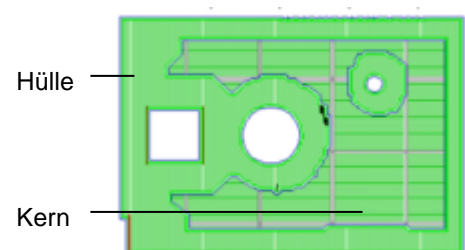


**Bild 1:** Bauplattform mit aufgesinterten Bauteil

Ebenfalls ist es möglich, die Werkstücke auf Stützstrukturen (Supports) aufzubauen, die mit der Grundplatte verbunden sind. Nach dem Bauprozess kann an diesen Stellen das Werkstück von der Bauplattform abgesägt werden.

#### 1.2 Bohrungen

Beim DMLS-Prozess werden die Werkzeuge in einer sogenannten Hülle-Kern-Struktur aufgebaut. Dies bedeutet, dass das Bauteilvolumen in einen Hüllbereich (Skin) und einen Kernbereich (Core) aufgeteilt wird, die mit unterschiedlichen Belichtungsparametern - und sogar mit unterschiedlichen Schichtdicken - aufgebaut werden (siehe **Bild 2**). Sinn dieser Unterscheidung ist es, eine harte Oberfläche, bei gleichzeitig weichen Bauteilinneren, zu erreichen. Typischerweise besitzt der Hüllbereich eine Schichtdicke von 0,05 mm. Die Schichtdicke des Kernbereichs beträgt 0,1 mm, wodurch sich die Bauzeit, ohne Qualitätsverlust an der Oberfläche, wesentlich verkürzt.



**Bild 2:** Bauteilschicht mit Hülle-Kern-Struktur

Aufgrund dieses Hülle-Kern-Aufbaus sollten Kühlkanäle, Bohrungen für Auswerfer, Stifte und Befestigungsschrauben, usw. bereits in der CAD-Konstruktion berücksichtigt werden. Werden diese Bohrungen im CAD-File nicht vorgesehen und erst nachträglich eingebracht, verläuft die Materialausparung durch den mechanisch wesentlich instabileren Kernbereich. Dies kann zur Folge haben, dass z.B. nachträglich geschnittene Gewinde ausbrechen.

Zudem wird der Randbereich der einzelnen Schichten, also die Kontur, mit sehr hoher Laserleistung belichtet, was zu einer höheren Festigkeit führt. Dieser Bereich ist ausgehend von Rand etwa 1 mm tief. Wird eine mechanische Nachbearbeitung innerhalb dieser Tiefe durchgeführt, werden die besten Ergebnisse hinsichtlich Oberflächenqualität und Bauteilhärte erreicht. Bei der Konstruktion sollten deshalb die Durchmesser der gewünschten Bohrungen ca. 0,6 mm kleiner sein und anschließend aufgebohrt werden. Die Seitenwände befinden sich dann im höchsten Festigkeitsbereich der Kontur.

### 1.3 Genauigkeit

Da beim DMLS-Prozess die Werkstücke aus Metallpulver generiert werden, liegt die Rauigkeit der Oberflächen und die Maßhaltigkeit im Bereich der Pulverkorngöße. So sind mit dem Metallpulver DirectMetal 50-V2 (Korngöße 50 µm) Genauigkeiten von  $\pm (0,07 \% + 50 \mu\text{m})$  zu erreichen. Senkrecht zu den einzelnen Schichten wird die Auflösung durch die Schichtdicke bestimmt. Diese beträgt bei DirectMetal 50-V2 0,05 mm.

### 1.4 Minimale Strukturen

Beim DMLS-Prozess ist der fokussierte Laserstrahl, mit einem Durchmesser von ca. 0,3 mm, das Werkzeug zum Aufbau der Geometrien. Durch Wärmeleitungseffekte beträgt die Aushärtebreite (Aushärtezone) etwas mehr als der Fokussdurchmesser. Die minimale Aushärtebreite liegt bei DirectMetal 50-V2 zwischen 0,6 mm und 0,7 mm. Strukturen die kleiner sind können deshalb nicht hergestellt werden. Dies ist besonders bei spitzen Ecken und Kanten oder dünnen Stegen zu beachten.

### 1.5 Nuten und Entformungsschrägen

Befinden sich in lasergesinterten Formen tiefe Nuten, so müssen diese mit Entformungsschrägen versehen werden. Ist die Nut in Entformungsrichtung polierbar, genügen Entformungswinkel von 0,5° bis 1,0°. Ist sie nicht zugänglich, muss dieser Wert erhöht werden. Falls dieses aus geometrisch-

konstruktiven Gründen nicht möglich ist, sollte an dieser Stelle eine Trennebene vorgesehen werden, um dann die Flächen einzeln nachbehandeln zu können.

### 1.6 Rippen

Beim Lasersinterprozess mit DirectMetal 50-V2 entstehen poröse Metallteile, die nach dem Bauprozess mit Epoxid-Harz infiltriert werden. Diese Werkstücke reagieren aufgrund ihrer Inhomogenität auf Zugbelastungen, im Vergleich zu Vollmaterialien, empfindlicher.

Die an Rippen auftretenden Belastungen können bei einem zu großen Höhen-Breiten-Verhältnis zum Verbiegen oder zum Abriss der Struktur führen. Bei den in der **Tabelle 1** dunkel dargestellten Seitenverhältnissen zwischen Rippenhöhe und -breite sollten deshalb Stahlstege in die Rippen eingesetzt werden. Die dazu erforderlichen Aussparungen müssen schon im CAD-File vorgesehen werden.

	Höhe [mm]					
Breite [mm]	< 1	1	2	5	10	10
< 1						
1						
2						
3						
5						
> 5						

Tab. 1: Seitenverhältnisse bei Rippen

### 1.7 Stifte

Das gleiche gilt für Stifte, die sich in dem aufzubauenden Werkzeug befinden. Bei zylindrischen Geometrien ist es in den meisten Fällen zu empfehlen Stahlstifte - in vorher im CAD-File konstruierte Bohrungen - einzusetzen. Der Aufwand für die Nachbearbeitung wird dadurch wesentlich reduziert. Bei nicht rotationssymmetrischen Geometrien sollten bei den in **Tabelle 2** dunkel markierten Höhen-Durchmesser-Verhältnissen ebenfalls Stahlverstärkungen eingesetzt werden.

	Höhe [mm]					
Ø [mm]	< 1	1	2	5	10	10
< 1						
1						
2						
3						
5						
> 5						

Tab. 2: Geometrieverhältnisse bei Stiften

### 1.8 Angußkanäle

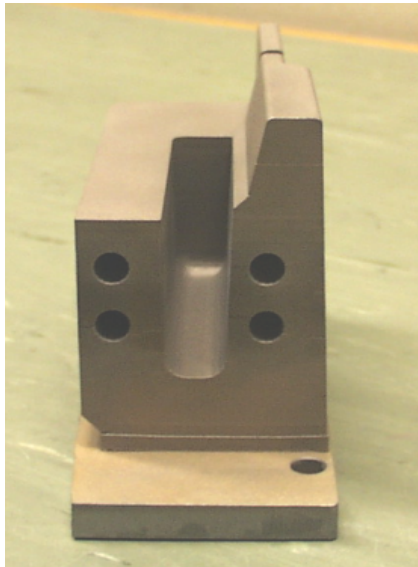
Um im Bereich des Angußkanals Auswaschungen beim Einspritzvorgang zu vermeiden, sollte dieser



im CAD-File vorbereitet sein. Durch die Belichtung der Kontur wird eine Steigerung der Oberflächenhärte - und damit des Verschleißverhaltens - erreicht.

### 1.9 Kühlkanäle

Durch den schichtweisen Aufbau beim Sinterprozess ist es möglich, Kühlkanäle dreidimensional und an die Geometrie der Kavität angepasst durch das Werkzeug verlaufen zu lassen. Hierdurch wird eine wesentlich effektivere Kühlung erreicht.



**Bild 3:** Bauteil mit integrierten 3D-Kühlkanälen

Während der Konstruktion der Kühlkanäle sollte darauf geachtet werden, dass die Anschlüsse so liegen, dass kein unnötiges Volumen aufgebaut wird. So ist es beispielsweise möglich, die Anschlüsse direkt an die Stahlplatte zu legen. Nach dem Generieren der Form werden dann die entsprechenden Zuleitungen durch die Stahlplatte gebohrt.

### 1.10 Bearbeitungszugaben

Beim Einpassen der Formeinsätze werden diese in den meisten Fällen umfräst oder geschliffen. Dazu ist in der Konstruktion ein Übermaß von 0,2 mm bis 0,5 mm auf jeder relevanten Fläche vorzusehen. An Trennebenen reicht ein Übermaß von 0,2 mm. Diese können später mechanisch nachbearbeitet oder aufeinander erodiert werden. Die eine Formhälfte wird dann als Elektrode und die Andere als Werkstück verwendet.

### 1.11 Einbau in Stammwerkzeugen

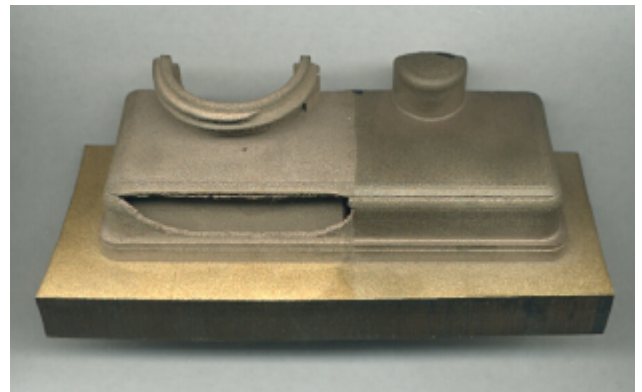
Beim Aufbau des Stammwerkzeuges ist darauf zu achten, dass die Trennflächenbelastung bzw. der Zuhaltedruck der Spannvorrichtung zumindest teilweise am Stammwerkzeug anliegt.

## 2 Praktische Beispiele

In diesem Abschnitt werden noch einmal Beispiele für Rapid Tooling gerechte bzw. nichtgerechte Konstruktionen gezeigt, und auf mögliche Auswirkungen für das Werkstück, die Rapid Tooling Anlage und eine anschließende Nachbearbeitungen eingegangen.

### 2.1 Wandstärken

**Bild 4** zeigt eine durch den Abstreifer eingedrückte Bauteilwand. Ursache hierfür war eine unzureichende Wanddicke (1,5 mm) im Vergleich zur Wandhöhe (20 mm).



**Bild 4:** ungenügende Wandstärke

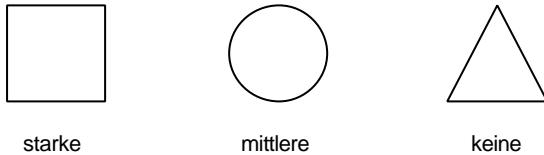
Zu vermeiden wäre die Bauteilerstörung gewesen durch eine größere Wandstärke, das Anbringen von Verstärkungsrippen oder eine andere Anordnung des Bauteils auf der Bauplattform.

Als Folge dieses Konstruktionsfehlers können weitere Werkstücke auf der Bauplattform beschädigt werden, und zwar wenn der Abstreifer bei seiner Weiterfahrt Bruchstücke mitschleift, die dann bereits gesinterte Schichten zerstören oder den Aufbau neuer Schichten verhindern. Zudem ist es möglich, dass durch die Bruchstücke oder durch die Bruchstelle Kerben an der Abstreiferklinge entstehen, wodurch dieser unbrauchbar wird.

Ein Abrechen oder Eindringen von Bauteilstrukturen ist also unbedingt durch entsprechende konstruktive Maßnahmen zu vermeiden.

### 2.2 Bohrungen und Überhänge

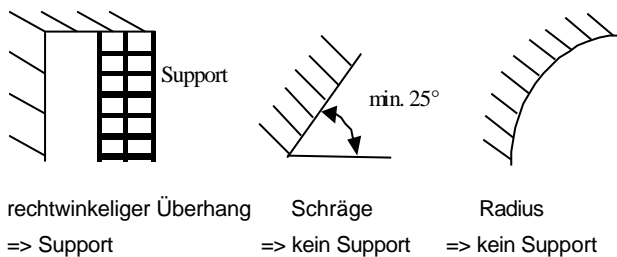
Bei waagerechten Bohrungen und Überhängen (max. 3 mm) kommt es prozessbedingt zu sogenannten Vertropfungen. Darunter versteht man das Fließen von aufgeschmolzenen Metallpulver in darunter liegende, nicht belichtete Schichten. Vermeiden lässt sich dieser Effekt durch das Anbringen von Supports, das Verrunden von rechtwinkligen Überhängen und die konstruktive Formgebung der Bohrungen (siehe **Bild 5**).



**Bild 5:** Tropfenbildung in Abhängigkeit von der Form

### 2.3 Supportgenerierung

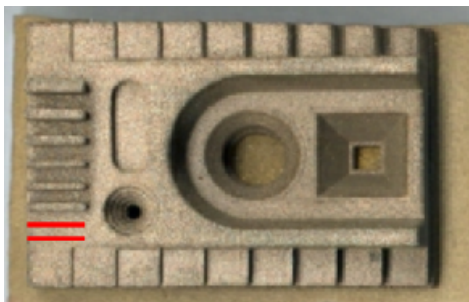
Bei der Konstruktion der Bauteile ist unbedingt darauf zu achten, dass möglichst wenig Stützstrukturen (Supports) erforderlich sind. Diese verlängern nur unnötig die Bauzeit, verbrauchen Metallpulver und müssen unter großen Aufwand nachträglich entfernt werden. Supports können aber durch konstruktive Maßnahmen, wie zum Beispiel durch das Anbringen von Schrägen oder Radien, relativ einfach vermieden werden (siehe **Bild 6**).



**Bild 6:** Vermeiden von Supports durch Formgebung

### 2.4 Minimale Strukturen

**Bild 7** soll verdeutlichen, was passiert, wenn die konstruierten Strukturen kleiner sind, als die minimale Aushärtbreite des Lasers.



**Bild 7:** Probebauteil mit nicht gesinterten Stegen

Auf der Oberseite des Probekörpers sollten eigentlich 8 Stege mit einer abnehmenden Breite von 1,1 bis 0,4 mm gesintert werden. Bis zu einer Breite von 0,7 mm war dies auch ohne Probleme möglich. Beim sechsten Steg von oben (0,6 mm) macht sich aber der sogenannte „Überschwing-Effekt“ bemerkbar. Dieser tritt auf, wenn die Abmaße der Bauteilstruktur kleiner oder gleich dem Laserdurchmesser sind und bewirkt eine Vergrößerung der tat-

sächlich gesinterten Struktur. Dieser Effekt tritt auch bei spitz zulaufenden Kanten und Ecken auf.

Die beiden unteren Stege (rot bzw. dunkel eingezeichnet) wurden aufgrund ihrer zu kleinen Abmessungen von 0,5 bzw. 0,4 mm nicht hergestellt. Verantwortlich hierfür ist die Prozesssoftware der Rapid Tooling Anlage, die beim Unterschreiten der minimalen Dimensionen automatisch Strukturen entfernen kann. Der Maschinenbediener sollte sich vor dem Bauprozess also noch einmal alle kritischen Punkte der Konstruktion in der Prozesssoftware ansehen.

### 2.5 Risse im Bauteil

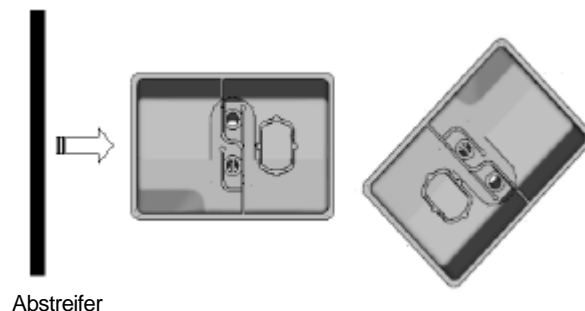
Ursache für Risse in lasergesinterten Bauteilen können die gewählten Belichtungsparameter oder die konstruktive Gestaltung sein. Um ein Ablösen von Schichten schon während des Bauprozesses zu verhindern und eine möglichst feste Baustuktur zu erreichen, sollte für die Belichtung der Hülle der Fülltyp „UpDown-Stripes“ und „Square“ für den Bauteilkern verwendet werden.

Konstruktiv können Bauteilrisse durch das Anbringen von Radien und das Vermeiden von großen Wandstärkenunterschieden und Materialanhäufungen verhindert werden. Zudem ist es möglich, einen internen Support zu generieren.

Weiterhin sollte das fertige Bauteil nicht sofort aus dem Pulverbett entfernt werden, um Spannungen durch ein zu schnelles Abkühlen zu vermeiden.

### 2.6 Anordnung auf der Bauplattform

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Anordnung der Werkstücke auf der Bauplattform. Dünne Wände oder Stege sollten immer in Richtung der Abstreiferfahrt oder in einem Winkel von 45° dazu liegen, um ein Abknicken bzw. Eindringen zu verhindern (siehe **Bild 8**).



**Bild 8:** Anordnung der Bauteile zum Abstreifer



Ansonsten muss darauf geachtet werden, dass Beschädigungen an kritischen Bauteilen nicht zur Zerstörung von weiteren Werkstücken führen. Dies kann zum Beispiel durch ein seitliches Versetzen der Bauteile erreicht werden.

### 3 Zusammenfassung

An den aufgeführten Konstruktionsregeln und praktischen Beispielen wird deutlich, wie entscheidend die Rapid Tooling gerechte Gestaltung für den Erfolg des Bauprozesses ist. Aus diesem Grund werden hier noch einmal die wichtigsten Kriterien in Checklistenform aufgeführt. Diese Punkte müssen vom Konstrukteur in allen Stadien der Produktentwicklung berücksichtigt werden.

#### 1. Bauteilgeometrie:

- Werden große Wandstärkenunterschiede vermieden?
- Sind die Außenkonturen mit Radien versehen?
- Kommt es zu Materialanhäufungen?
- Kann die Bauplattform als Teil des Werkstücks verwendet werden?
- Sind die Außenmaße so klein wie möglich?

#### 2. Bohrungen:

- Sind sämtliche Bohrungen in der CAD-Konstruktion vorgesehen?
- Auswerferbohrungen?
- Bohrungen für Befestigungsschrauben?
- Angußbohrungen?
- Gewindebohrungen?
- Durchmesser der Bohrungen im CAD-File 0,6 mm kleiner als der Sollwert?

#### 3. Minimale Strukturen:

- Können spitze Ecken und Kanten vermieden werden?
- Sind Strukturen kleiner als 0,7 mm?
- Müssen Stützrippen vorgesehen werden ?

#### 4. Nuten:

- Sind für tiefe Nuten Ausformschrägen vorgesehen?
- Sind die Nuten zum Schleifen und Polieren frei zugänglich?
- Muss eine Werkzeugteilung vorgesehen werden?

#### 5. Rippen:

- Sollen Rippen aus Stahl eingesetzt werden?
- Sind die Taschen dafür im CAD-File vorgesehen?

#### 6. Stifte:

- Sind die Stiftdurchmesser im Verhältnis zur Höhe groß genug?
- Sollen Stifte nachträglich eingesetzt werden?

#### 7. Angußkanal:

- Ist der Angußkanal in der CAD-Konstruktion vorgesehen?

#### 8. Kühlkanäle:

- Können 3-dimensional verlaufende Kühlkanäle verwendet werden?
- Liegen diese nahe genug an der formgebenden Geometrie?
- Wird mit Luft oder Wasser gekühlt?
- Wie sind die Anschlussmaße für die Kanäle?

#### 9. Bearbeitungszugaben:

- Sind Bearbeitungszugaben zum Einpassen der Einsätze ins Stammwerkzeug vorhanden?
- Sind Bearbeitungszugaben an den Trennflächen vorgesehen?
- Betragen die Bearbeitungszugaben min. 0,5 mm?

#### 10. Einbau ins Stammwerkzeug:

- Sind die Einsätze umfassend montiert?
- Liegt der Zuhaltedruck nicht nur an den Einsätzen sondern auch am Stammwerkzeug an?

#### 11. Supports:

- Sind nur unbedingt notwendige Supportstrukturen vorhanden?
- Kann durch konstruktive Maßnahmen auf Supports verzichtet werden?
- Lassen sich die Supports einfach entfernen, ohne dabei das Bauteile zu beschädigen ?

#### 12. Durchbrüche und Überhänge:

- Ist kein rechtwinkliger Überhang größer als 3 mm?
- Beträgt die Neigung von Schrägen min. 25° ?
- Lässt sich die „Tropfenbildung“ durch entsprechende Formgebungen vermeiden?
- Wird keine Bauteilstruktur „freischwebend“ gebaut?

**13. Radian:**

- Sind soweit möglich alle Ecken und Kanten mit Radian versehen?
- Kann es durch zu große Radian zum „Stufen-Effekt“ kommen?

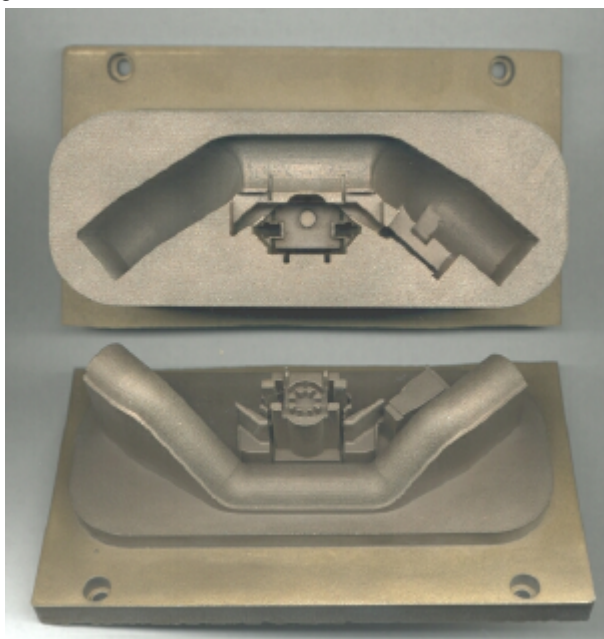
**14. Anordnung auf der Bauplattform:**

- Liegen dünne Wände und Stege in Richtung der Abstreiferfahrt?
- Können Schäden an einem Bauteil zu Folgeschäden an anderen Bauteilen führen?

**15. Datenqualität:**

- Sind alle Bauteilvolumen geschlossen?
- Sind verdrehte oder fehlerhafte Dreiecke vorhanden?
- Wurde das Bauteil in Skin/Core-Schichten zerlegt ?
- Beträgt die Schichtdicke 0,05 mm?
- Wurden Skin, Core und Support die richtigen Belichtungsparameter zugeordnet?
- Ist die Netzdichte bei der STL-Generierung auf maximalen Wert gestellt worden?

Werden diese Punkte vom Konstrukteur beachtet, können durch den DMLS-Bauprozess in kürzester Zeit sehr strukturierte und belastbare Werkzeuge oder Prototypen hergestellt werden. Ein Beispiel dafür ist der in **Bild 9** dargestellte Kabelkanal. Die Kavitäten wären mit konventionellen Fertigungsverfahren nur unter großen Aufwand herzustellen gewesen.



**Bild 9:** lasergesinterte Formhälften

**4****Literatur**

- /1/ EOS; Basis Training  
EOS GmbH, Planegg, 1999
- /2/ EOS; Betriebsanleitung EOSINT M 250  
EOS GmbH, Planegg, 1999

## Windentrommeln auf dem Prüfstand

Mupende, I.; Otto, St.

*„Hurra !“: mit dieser spontanen Begeisterung kommentierten Prof. Dietz und die „Seiltrommelgemeinde“ des IMW die genehmigte Sachbeihilfe der Deutschen Forschungsgemeinschaft für den Bau eines Windenprüfstands, der seines gleichen sucht. Nach einer langwierigen Antragsphase fiel damit der Startschuß für ein Projekt, das in Zusammenarbeit mit der Firma Rotzler im April dieses Jahres seinen erfolgreichen Abschluß fand. Die Geräteausrüstung des Instituts ist seither um eine „Perle“ reicher. Das Leistungsangebot für Seil- und Seiltrommeluntersuchungen wurde damit gleichzeitig komplettiert. Der Artikel beschreibt die technischen Details des Windenprüfstands und stellt dessen Einsatzmöglichkeiten kurz vor.*

*„Hurra!“: this was the spontaneous response of Prof. Dietz and the „hoisting drum-investigating“ assistants to the approved financial sponsorship by the German Research Association for the construction of a drum-winch test rig which is almost unique. After a long phase of application this was the starting shot for a project that was successful finished in April this year in cooperation with the company Rotzler. The article describes the technical details and potential applications of this test rig.*

### 1 Hintergrund der 750.000 DM-Investition

Die Gestaltung und Dimensionierung von Seiltrommeln erfolgt bis heute hauptsächlich nach firmeninternen Richtlinien, die auf genormten Auslegungsvorschriften und auf den jahrzehntelangen praktischen Erfahrungen der Hersteller basieren. Diese Vorgehensweise gewährleistet zumeist nicht die Verwirklichung von optimierten Leichtbaukonstruktionen, welche beispielsweise für den Einsatz in Mobilkränen und Aufzügen immer häufiger gefordert werden.

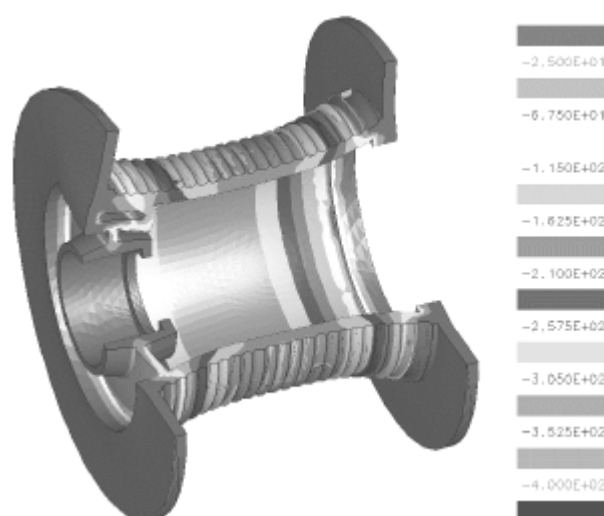
Ausgehend von den aktuellen Forschungsergebnissen des Instituts auf dem Gebiet der Seiltrommeldimensionierung muß deutlich akzentuiert werden, daß es einer dringenden Überarbeitung der gültigen Berechnungsverfahren bedarf. Derzeit profilieren sich nur sehr wenige Unternehmen durch die Umsetzung neuester Berechnungsmethoden, mit denen eine Reduzierung des Seiltrommelgewichts um 20% bereits erreicht werden konnte /1/.

Das Ziel der am IMW laufenden Forschungsvorhaben ist die Weiterentwicklung bestehender, analytischer Berechnungsmethoden /2/ hinsichtlich einer genaueren, wissenschaftlich abgesicherten Beschreibung der Trommelbeanspruchungen. Damit sollen zugleich die Voraussetzungen für die praktische Umsetzung eines gewichtsoptimierten Trommeldesigns geschaffen werden.

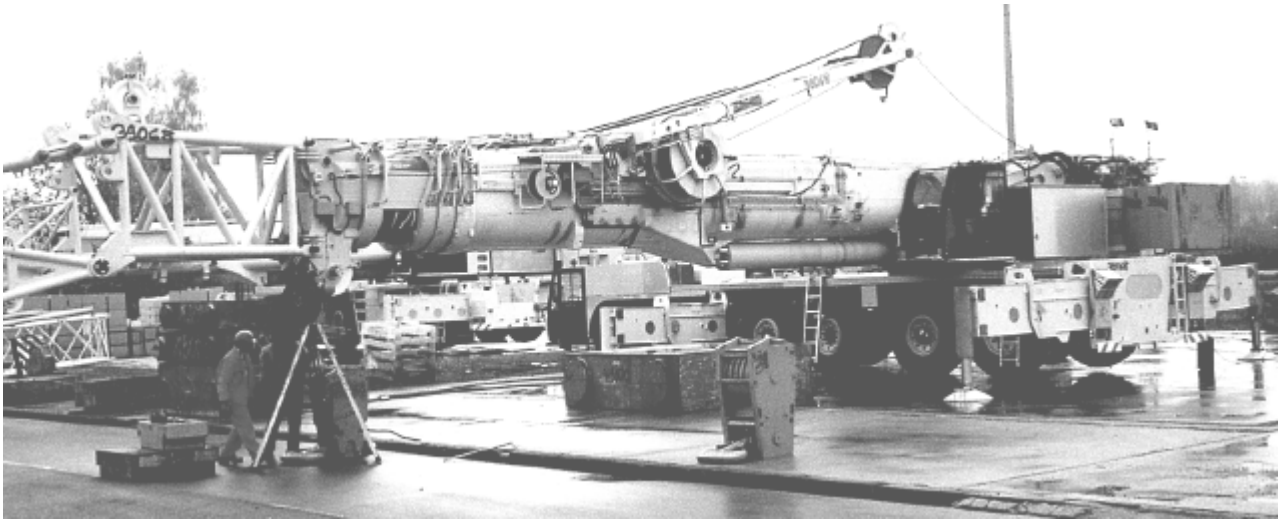
Als wichtige Zwischenergebnisse im Hinblick auf die Entwicklung neuer Berechnungsmethoden können folgende Erkenntnisse der bereits abgeschlossenen Untersuchungen genannt werden:

- Berücksichtigung eines lagenabhängigen Querelastizitätsmoduls bei der Ermittlung der Trommelmantelbeanspruchungen,
- Entwicklung eines durchgängig analytischen Berechnungsansatzes, der die Interdependenzen zwischen Mantel- und Bordscheibenverformungen bzw. -beanspruchungen einschließt und damit die allgemein getrennt durchgeführte Auslegung von Mantel und Bordscheibe erstmals kombiniert.

Für die Durchführung der Forschungsarbeiten werden analytische Verfahren (z.B. Schalen- und Platten-theorie), numerische Methoden (FEM) und experimentelle Messungen eingesetzt. **Bild 1** zeigt exemplarisch ein für Parameteruntersuchungen verwendetes FE-Modell einer berillten Seiltrommel.



**Bild 1:** FE-Modell (geschnittene Ansicht) einer berillten Seiltrommel



**Bild 2:** Beanspruchungsanalyse einer Seiltrommel im Mobilkran

Die experimentelle Verifikation der analytischen und numerischen Ergebnisse war in der Vergangenheit sehr schwierig. Messungen wurden beispielsweise direkt in Mobilkränen durchgeführt (**Bild 2**); und dies bei hohem Kosten- und Zeitaufwand der in den Forschungsprojekten eingebundenen Unternehmen.

Mit dem im April dieses Jahres in Betrieb genommenen Universal-Seiltrommelprüfstand können nun erstmals experimentelle Beanspruchungsanalysen an Seiltrommeln im eigenen Haus – unter optimalen Versuchsbedingungen – kostengünstig durchgeführt werden. Die technischen Eigenschaften des Prüfstandes, die im **Kap. 3** detailliert beschrieben werden, ermöglichen die Simulation realer Betriebsbelastungen für ein breites Spektrum von Hub- und Bergewinden. Dabei sind zukünftige Untersuchungen zur Klärung:

- des Zusammenspiels zwischen verschiedenen Trommelkonstruktionen und den aufgelegten Draht- oder Kunststoffseilen,
- der Auswirkung von Belastungen bis in den teilplastischen Materialbereich der Trommel und
- des Spulungsverhaltens verschiedener Draht- und Kunststoffseile

nur einige der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten dieses Prüfstandes.

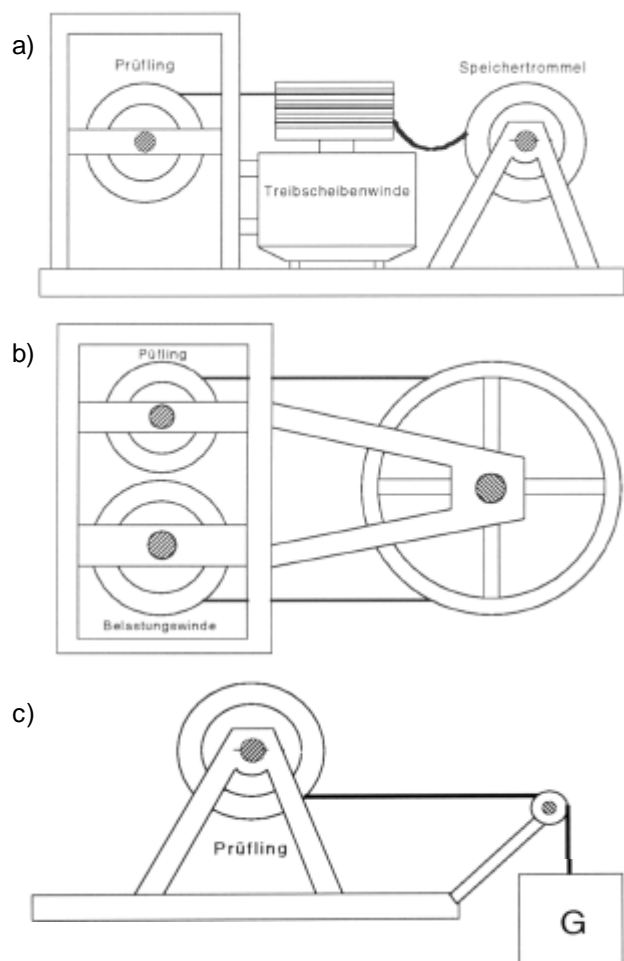
In Zusammenarbeit mit einem bekannten Kranhersteller wurden erste umfangreiche Meßreihen durchgeführt, über die in einem separaten Artikel dieser Ausgabe der Institutsmitteilung berichtet wird.

## 2 Prüfstandskonzeption

Für die Arbeitsweise eines Seiltrommelprüfstandes sind unterschiedliche Funktionsprinzipien denkbar.

Ein wesentlicher Unterschied ist die Art der Lastzeugung auf den Prüfling. **Bild 3** stellt drei mögliche Varianten dar, die in der frühen Entwurfsphase für den Prüfstand durchdacht wurden:

- als Bremse wirkende Treibscheibenwinde,
- als Bremse wirkende Windentrommel,
- Gewichtskraft.



**Bild 3:** Belastung der Prüfwinde durch a) Treibscheibenwinde als Bremse; b) Windentrommel als Bremse; c) Gewichtskraft /3/

Die Ausführung des Prüfstandes als Hubwinde (vgl. **Bild 3c**) wurde ausgeschlossen, weil dieses Funktionsprinzip durch den Nachteil gekennzeichnet ist, daß Versuchsreihen nur mit konstanter Seilkraft hätten durchgeführt werden können. Außerdem wäre eine mehrlagige Bewicklung aufgrund der erforderlichen Seillänge und der damit verbundenen großen Hubhöhe schwierig zu realisieren gewesen. Mit dem Einsatz verspannter Winden (vgl. **Bild 3a** und **Bild 3b**) ist die Möglichkeit einer variablen Lasterzeugung gegeben. Die Kombination Windentrommel (Prüfling)/Treibscheibenwinde (Bremse) gewährleistet dabei prinzipbedingt eine einfachere Regelung der Seilzugkraft und -geschwindigkeit gegenüber der Kombination Windentrommel (Prüfling)/Windentrommel (Bremse). Dies liegt darin begründet, daß bei einer Treibscheibenwinde Zugkraft und Geschwindigkeit aufgrund des gleichbleibenden Radius des Seilauslaufs konstant sind. Dieser Vorteil, zusammen mit der Realisierung hoher Stranglasten, waren letztlich ausschlaggebend für die Wahl einer Treibscheibenwinde als lasterzeugende Komponente für den Prüfstand.

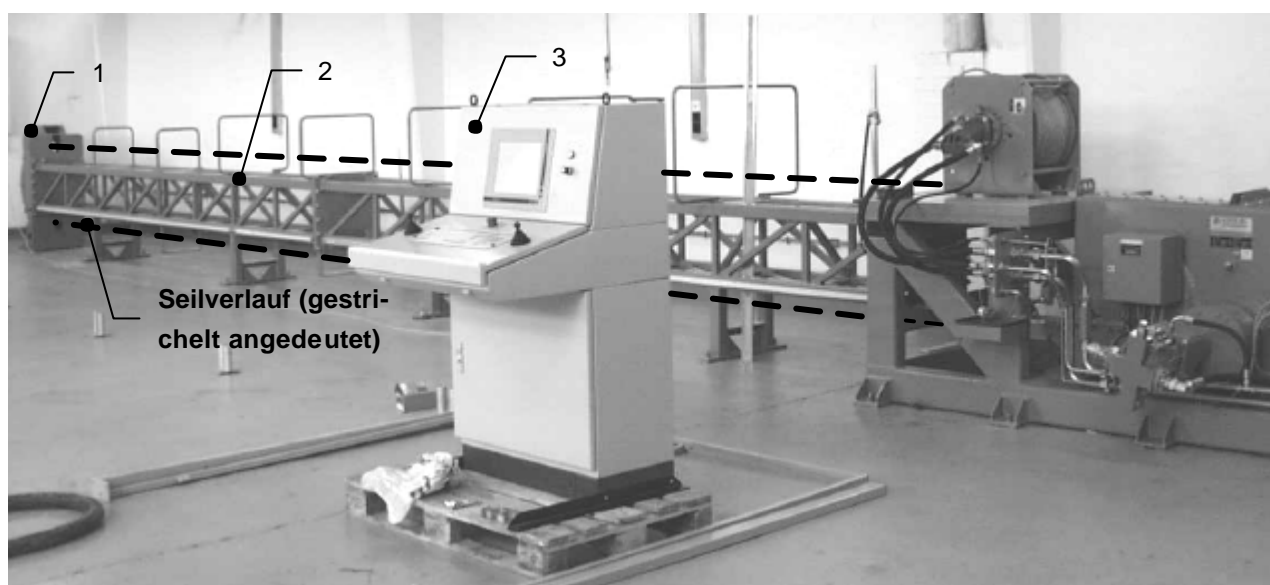
Ausgehend von den erwünschten Prüfaufgaben und aufbauend auf den Erfahrungen, die bereits Prof. Dietz beim Einsatz eines selbst konstruierten Seiltrommelprüfstandes im Rahmen seiner Promotion [2] sammelte, wurden weitere Anforderungen an den zu entwickelnden Universal-Seiltrommelprüfstand definiert. Dabei bestand das grundlegende Interesse darin, ein breit gefächertes Anwendungsfeld zu erschließen, welches neben der Beanspruchungsanalyse von Trommelwinden unter-

schiedlichster Abmessungen auch die experimentelle Untersuchung anderer Seiltriebkomponten, wie Treibscheiben und Umlenkrollen, beinhaltet.

### 3 Aufbau, Funktion und technische Daten

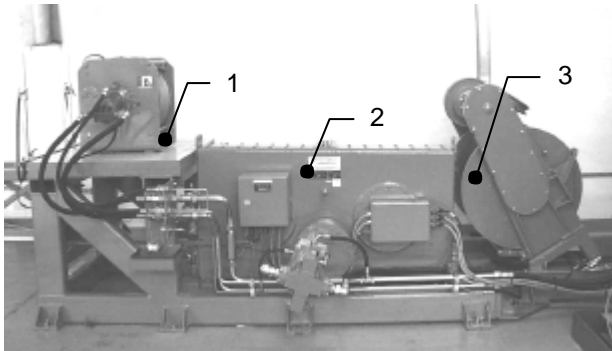
**Bild 4** zeigt eine Gesamtansicht des ausgeführten Prüfstandes, der eine Gesamtlänge von 16 m mißt. Als wichtigste (und kostenintensivste) Baueinheit ist die Treibscheibenwinde HS 200 der Firma Rotzler zu nennen, mit der Zugkräfte bis zu 300 kN und Seilgeschwindigkeiten bis zu 40 m/min realisiert werden können. Weiterhin bietet sie die Möglichkeit, Seile mit Durchmessern zwischen 12 mm und 29 mm einzusetzen, womit sich ein umfangreiches Spektrum an Prüfaufgaben ergibt. Das nahezu lastfrei aus der Treibscheibenwinde auslaufende Seil wird auf eine Speichertrommel gewickelt, die in Abhängigkeit des verwendeten Seildurchmessers Seillängen zwischen ca. 400 m und ca. 600 m aufnimmt. Diese hohe Speicherkapazität gewährleistet die Durchführung von Versuchsreihen, bei denen die Prüfwinde in weiten Grenzen mehrlagig bewickelt werden kann.

Der Aufnahmerahmen der Prüfwinde wird auf einer Spannplatte verschraubt. Als maximale Abmessungen für den Prüfling sind Trommeldurchmesser bis zu 800 mm und Trommellängen bis zu 1000 mm zulässig. Für berillte Windentrommeln bis zu dieser Größe wird durch die gegebene Spulungslänge ein fehlerfreies Bewickeln garantiert. *Die Untersuchung größerer Prüflinge oder glatter Trommeln mit Seilwickelvorrichtung ist im Einzelfall ebenfalls möglich,*



**Bild 4:** Universal-Seiltrommelprüfstand zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme; 1) Umlenkscheibe, die sich über einen Hebel auf einer Kraftmeßdose zur Erfassung der Seilzugkraft abstützt; 2) Gittermast mit Seilfängen; 3) Steuerpult für den manuellen und automatischen Prüfstandsbetrieb

hierfür erforderliche Umbauarbeiten am Prüfstand können gegebenenfalls vom Werkstattpersonal des Instituts durchgeführt werden. **Bild 5** gibt einen detaillierten Blick auf die beschriebene Baueinheit bestehend aus der Spannplatte mit Prüfwinde, der Treibscheibenwinde und der Speichertrommel.



**Bild 5:** Blick auf 1) die Spannplatte mit Prüfwinde, 2) die Treibscheibenwinde und 3) die Speichertrommel mit Seilwickelvorrichtung

Prüf- und Bremswinde sind über das aufgelegte Seil mechanisch gekoppelt, der Antrieb beider Winden erfolgt in einem verspannten Hydraulikkreislauf. Für die Lastfälle „Aufspulen“ und „Abspulen“ übernehmen die hydraulischen Antriebe abwechselnd die Brems- bzw. Antriebsfunktion. Um den variablen Einsatz des Prüfstandes zu garantieren, können die Hydraulikmotore für den Antrieb der Prüfwinden über Schlauchanschlüsse mit dem Ölkreislauf des Prüfstandes verbunden werden. Neben den Druckleitungen ( $p_{\max} = 310 \text{ bar}$ ,  $\dot{V}_{\max} = 180 \text{ l/min}$ ) stehen Anschlüsse für Spülöl und eine hydraulisch betätigte Bremse zur Verfügung (**Bild 6**).



**Bild 6:** Hydraulikanschlüsse für die Prüfwinde

Der Prüfstand kann sowohl manuell mittels Joysticks als auch automatisch betrieben werden. Der manuelle Prüfstandsbetrieb dient ausschließlich

den Versuchsvorbereitungen (Auflegen des Seils, Einstellen der Sensoren zur Detektierung des Lagenwechsels und der Seilendabschaltung, Applikation und Kalibrierung der Meßtechnik etc.). Die Versuchsdurchführung erfolgt im automatischen Prüfbetrieb. Hierbei kann die Seilzugkraft und -geschwindigkeit lagenweise vorgegeben werden, so daß die Beanspruchungen einer mehrlagig bewickelten Trommel unter verschiedenen Lastsituationen (z.B. konstante Zuglast in allen Lagen oder Bewicklung mit niedrigen Seilzugkräften in den unteren und mit hohen in den oberen Lagen) analysiert werden können. Durch die Vorgabe der Zyklenanzahl (1 Zyklus = Auf- und Abspulen) sind auch Langzeitversuche möglich, mit denen u. a. der Einfluß des Seilverschleißes auf das Spulungsverhalten untersucht werden kann.

#### 4 Ausblick

Mit dem beschriebenen Windenprüfstand ist das IMW in der Lage, die analytischen und numerischen Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Seiltrommeldimensionierung auf ein experimentell abgesichertes Fundament zu stellen. In Verbindung mit einem am Institut konstruierten Prüfstand zur Ermittlung des lagenabhängigen Querelastizitätsmoduls von Draht- und Kunststoffseilen sind die experimentellen Voraussetzungen gegeben, um das Gesamtsystem „Seiltrommel/Seilpaket“ in seinen Teilsystemen „Trommel“ und „Seil“ sowie deren gegenseitiger Beeinflussung zu untersuchen. Dies beinhaltet u.a. die experimentelle Analyse der Bordscheiben- und Mantelbelastungen.

Neben dem Einsatz des Prüfstandes zur Kontrolle der in verschiedenen Forschungsprojekten entwickelten Dimensionierungsvorschriften bietet sich den Unternehmen aus der Fördertechnik die Möglichkeit, Gestaltungsoptimierungen an bereits bestehenden oder in der Entwicklung befindlichen Trommelkonstruktionen auszuführen.

#### 5 Literatur

- /1/ Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln; Dissertation TU Clausthal, 1999
- /2/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Dimensionierung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln; Dissertation TH Darmstadt, 1971
- /3/ Reintgen, T.: Entwicklung und Konstruktion eines Universalprüfstandes für Trommelwinden; Diplomarbeit TU Clausthal, 1997

## Lebensdauerprüfung von Gelenkwellen

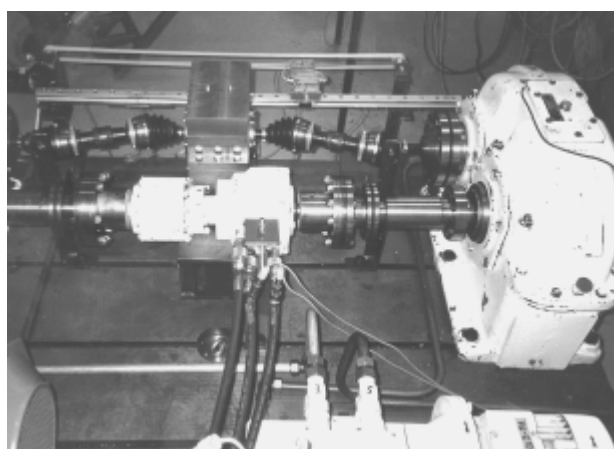
Tawil, M.

*In der letzten Ausgabe wurde der Versuchsaufbau, die Meßwerterfassung sowie Inbetriebnahme eines im Institut für Maschinenwesen (IMW) betriebenen Prüfstandes zur Untersuchung von Gleichlauffestgelenken an der Vorderachse von PKW beschrieben. Nach erfolgreichem Abschluß der Versuche werden nun die Untersuchungsergebnisse präsentiert.*

*In the last issue the test structure, the measurement registration as well as the starting up of a test bench in the Institut für Maschinenwesen (IMW) for examination of synchronized fixed joints at the front of cars have been described. After successful close of the attempts the results will be presented.*

### 1 Rückblick

Die Gelenkwellen eines PKW sorgen für die Drehmomentübertragung vom Getriebe an die Räder unter Winkerversatz /1/. Dabei entstehen Torsionsbeanspruchungen, die einen hohen Verschleiß in den Gelenken hervorrufen. Dieser Verschleiß äußert sich durch Pittingbildung an den Kugellaufbahnen und wird vom Schmiermittel beeinflusst. Die Größe der Pittingflächen gibt einen Aufschluß über die Gelenklebensdauer. Die vorliegende Untersuchung soll das Verhalten von Gleichlauffestgelenken bei Variation des Schmiermittels unter Betriebsbedingungen aufzeigen.



**Bild 1:** Verspannprüfstand

**Bild 1** zeigt den zur Versuchsdurchführung aufgebauten Verspannprüfstand. Der Versuchsaufbau besteht hauptsächlich aus zwei Wellensträngen und erlaubt die gleichzeitige Prüfung von vier

Gleichlauffestgelenken. Die zu untersuchenden Gelenke sind im vorderen Strang eingespannt. In der Mitte des vorderen Stranges befindet sich das Mittellager, durch dessen Verschiebung der gewünschte Winkel der Gelenkwellen eingestellt werden kann. Im hinteren Strang steht ein hydraulischer Verspannmotor zur Erzeugung eines konstanten Torsionsmoments zur Verfügung. Der vordere und hintere Strang werden über zwei Getriebe miteinander gekoppelt und bilden so einen geschlossenen Torsionsverspannkreis. Zur Überwachung des Torsionsmoments wurde im vorderen Wellenstrang zusätzlich eine Torsionsmeßwelle mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und Telemetrieübertragung integriert. Der gesamte Verspannkreis wird von einem E-Motor über einen Riemen angetrieben. Dabei wird die Drehzahl mit Hilfe eines elektromagnetischen Pulsgebers registriert. Damit kann die Lastwechselzahl in Umdrehungen festgehalten werden. Die Überwachung des Verschleißes in den Gelenken erfolgt indirekt über berührungslose Temperaturmessung während des Betriebes. Hierfür ist ein Infrarotsensor zur Erfassung der Temperatur in den einzelnen Gelenken auf einer linearen Verfahrenseinheit installiert. Die vom Sensor erfaßten Temperaturwerte werden in einem Meßrechner gespeichert. Die Kühlung der Gelenke wird über ein Gebläse gewährleistet. Die Steuerung der verschiedenen Prüfstandkomponenten erfolgt über eine SPS, die außerdem mit dem Meßrechner verbunden ist.

### 2 Versuchsdurchführung

Zunächst wurden die Gelenke mit Fett gefüllt, ca. 100 g pro Gelenk. Anschließend wurden vier Gelenke in den vorderen Strang des Prüfstandes eingebaut. Der geforderte Beugewinkel von 10° wurde durch das Verschieben des Mittellagers eingestellt. Danach wurde, zum Aufbringen des Torsionsmoments, der Verspannmotor eingeschaltet. Um den Verspannkreis in Drehung zu versetzen wurde der E-Motor angelassen. Mit Hilfe der Torsionsmeßwelle-DMS-Telemetrie-Einheit konnte das Torsionsmoment kontrolliert werden. Zur Gewährleistung einer fehlerfreien Temperaturmessung mit dem Infrarotsensor wurden die reflektierenden Ge-



lenkoberflächen schwarz lackiert. Die Gelenktemperaturen im Laufe eines jeden Versuches wurden kontinuierlich erfaßt und im Meßrechner gespeichert. Dies diente zum einen der Versuchsauswertung und zum anderen der Versuchsüberwachung. Als Abbruchkriterium für einen Versuch wurde der Temperaturanstieg in den Gelenken gewählt. Dies liegt darin begründet, daß der Verschleißbeginn mit einer Temperaturerhöhung in den Gelenken verbunden ist. Die Meßwerte des Sensors werden an den Rechner geschickt. Lagen die gemessenen Temperaturen außerhalb des am Rechner eingestellten Bereiches, so schaltete sich der Prüfstand ab und der Versuch konnte abgebrochen werden. Die im Rechner eingestellten Temperaturgrenzwerte sind Erfahrungswerte und vom verwendeten Schmiermittel abhängig. Aus diesem Grund wurden die Gelenke nach dem Versuch ausgebaut und der Verschleißbeginn kontrolliert. Im Falle eines fehlenden Verschleißes wurde das entsprechende Gelenk wieder eingebaut und weiter belastet. Die verschlissenen Gelenke wurden durch neue getauscht und ein neuer Versuch konnte begonnen werden. Die Versuche wurden unter den folgenden Betriebsbedingungen durchgeführt:

- Torsionsmoment: 500 Nm
- Beugewinkel: 10°
- Drehzahl: 308 min<sup>-1</sup>

Während der gesamten Versuchszeit herrschte eine nahezu konstante Umgebungstemperatur zwischen 18 - 20 °C. Außerdem wurden die Gelenke während des Betriebes über ein Gebläse konstant gekühlt. Bei der Untersuchung wurden 7 Schmiermittelsorten verwendet. Dabei wurden, um eine statistische Sicherheit zu gewährleisten, mehrere Gelenke je Sorte geprüft (**Tab. 1**). Aus Geheimhaltungsgründen dürfen die Bezeichnungen der verwendeten Schmiermittelsorten nicht veröffentlicht werden. An Stelle der genauen Bezeichnungen wurden hier die Buchstaben A - G eingesetzt.

Versuchsreihe	Schmiermittel	Gelenkanzahl
1	A	12
2	B	12
3	C	20
4	D	12
5	E	10
6	F	10
7	G	10

**Tab. 1:** Durchgeführte Versuchsreihen

### 3 Versuchsauswertung

Nach jedem Versuch wurden die verschlissenen Gelenke ausgebaut und vom Schmiermittel befreit. Danach wurden die einzelnen Gelenkkomponenten (Käfig, Gelenkstück, Kugelnabe und Kugeln) nummeriert. Dies ist notwendig, um nach dem Zerlegen des Gelenkes eine Zuordnung der einzelnen Komponenten zu gewährleisten.



**Bild 2:** Kugelabdrücke in der Kugelnabe nach einer Lastwechselzahl von ca. 3 Mio.



**Bild 3:** Kugelabdrücke am Käfig nach einer Lastwechselzahl von ca. 3 Mio.



**Bild 4:** Pitting auf den Kugellaufbahnen im Gelenkstück nach ca. 3 Mio. Lastwechseln

Anschließend wurden die einzelnen Komponenten auf Kantenbrüche untersucht und die Verschleißflächen (Pitting) vermessen. Die **Bilder 2 - 4** zeigen einige Beispiele für die aufgrund der Beanspruchung typischen Beschädigungen an den Gelenkkomponenten.

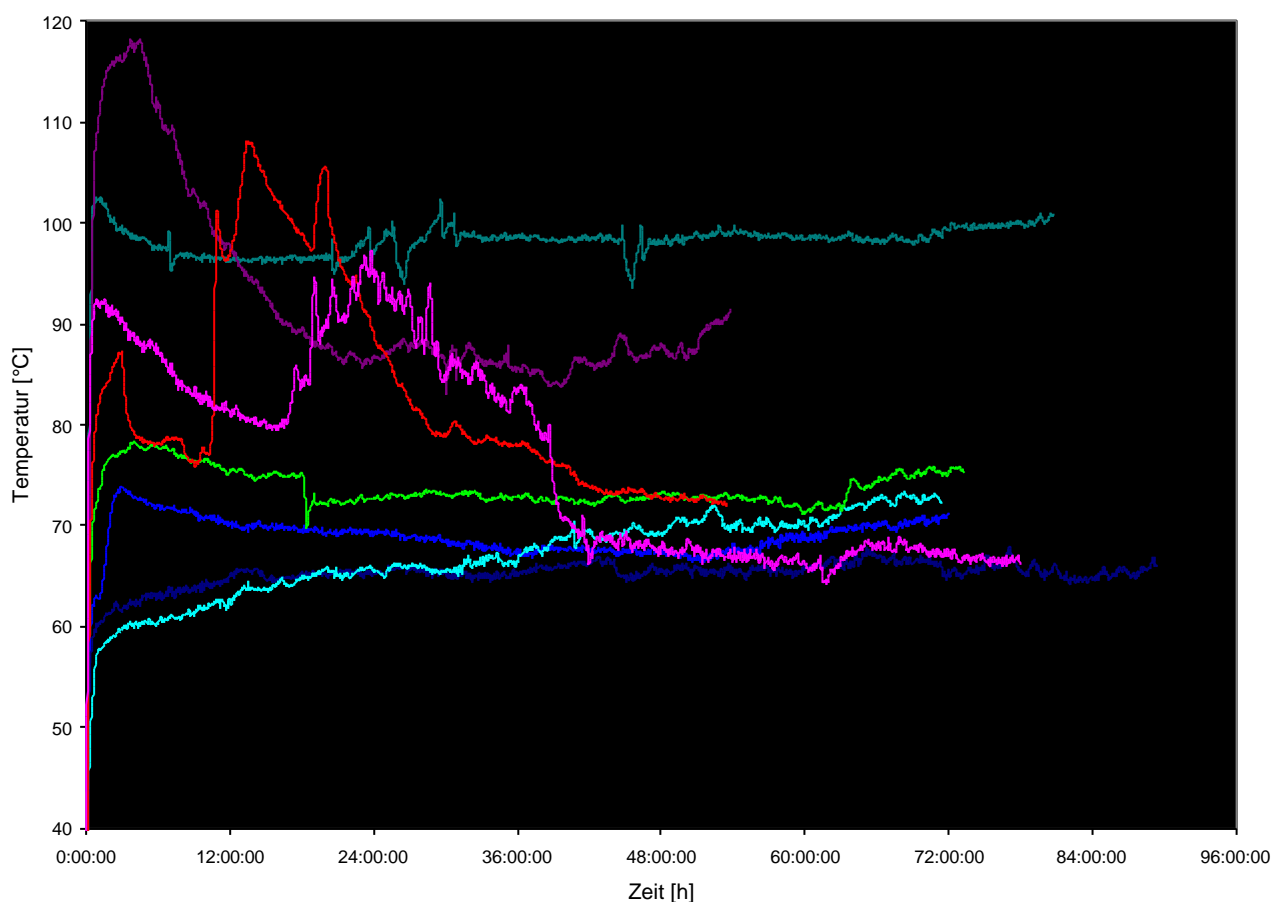
Die mit einem Kreis markierten Beschädigungsflächen werden ermittelt und in Tabellen mit den dazugehörigen Lastwechselzahlen eingetragen. Diese Verschleißwerte werden zur Ermittlung der Lebensdauer herangezogen.

Wie bereits erwähnt gibt das Temperaturverhalten der Gelenke während des Betriebes einen Aufschluß über das Verschleißverhalten. Anhand der im Laufe der Versuche erfaßten Temperaturwerte konnte festgestellt werden, daß der Temperaturverlauf von der Schmierstoffsorte sowie den Kühlungsverhältnissen abhängt. **Bild 5** zeigt die Temperatur-Zeit-Verläufe für die durchgeführten Versuchsreihen. Repräsentativ für die einer Versuchsreihe angehörnden Gelenke wurden die Meßwerte eines Gelenkes zur Erzeugung der jeweiligen Kurven benutzt. Um den Einfluß der Schmiermittelsorte

auf den Verschleiß zu verdeutlichen, wurden alle Kurven in einem Diagramm gezeichnet. Die Versuchsreihe mit dem Schmiermittel C und ein Teil der Versuchsreihe mit dem Schmiermittel G (im Diagramm mit G' bezeichnet) wurde unter, im Vergleich zu den restlichen Versuchsreihen, veränderten Kühlungsverhältnissen (doppelter Kühlungsabstand zu den Gelenken, halbe Luftmenge) durchgeführt. Dadurch wird der Kühlungseinfluß auf den Verschleißverlauf deutlich.

Besonders auffällig sind dabei drei Fettsorten (B, C und G). Das Fett B hat die höchste Beharrungstemperatur mit geringem Einlaufverhalten. Das Fett C hat ein extrem stark ausgeprägtes Einlaufverhalten mit zunächst überhöhter Temperatur. Das dritte Fett G hat ein ganz besonderes Temperatur-Zeit-Verhalten; nach einer kurzen Einlaufphase kommt es zu einem starken Temperaturanstieg der dann allmählich wieder abklingt.

Probemessungen haben gezeigt, daß die Temperatur des Schmiermittels um 20 °C höher liegt als die der Gelenkoberfläche. Die hier erfaßten Meßwerte gelten für die Gelenkaußenseite.



**Bild 5:** Temperatur-Zeit-Verläufe unter folgenden Betriebsbedingungen: Torsionsmoment = 500 Nm, Beugewinkel = 10°, Drehzahl = 308 min<sup>-1</sup>, Kühlungsabstand = 150 mm, Luftaustrittsdurchmesser = 60 mm

#### 4 Zusammenfassung

In den Entwicklungsabteilungen der Automobilhersteller und -zulieferer wird ständig daran gearbeitet, den Kraftstoffverbrauch bei steigender Motorleistung zu reduzieren. Denn heute sucht der anspruchsvolle Kunde umweltverträgliche und zuverlässige Fahrzeuge. Es wird intensiv versucht diese Eigenschaften durch den Einsatz von leichten Materialien zur Gewichtsreduzierung, dynamisches Eingreifen in die Motorsteuerung zur Leistungsoptimierung sowie Verbesserung der Antriebselemente zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und des Wirkungsgrades.

Im Antriebsstrang werden Gelenkwellen zur Übertragung des Drehmomentes vom Getriebe an die Räder verwendet. Dabei spielt das Schmiermittel eine zentrale Rolle in Bezug auf der Lebensdauer der Gelenke. In der durchgeführten Untersuchung wurde das Verschleißverhalten der Gleichlauflager unter Betriebsbedingungen bis zur Schädigung betrachtet. Während der Untersuchung wurde das Ende der Gelenklebensdauer mit den ersten Verschleißerscheinungen erreicht, die sich durch eine merkliche Temperaturerhöhung ankündigten. Schon ab diesem Zeitpunkt muss das Gelenk zur Vermeidung eines größeren Leistungsabfalls durch den mit der Lastwechselzahl exponentiell ansteigenden Verschleißfortschritt (**Bild 6 - 9**) ausgetauscht werden.

#### 5 Literatur

- /1/ Birkholz, H.; Judith, M.; Tawil, M.: Prüfstand zur Lebensdauerprüfung von Gelenkwellen. Institutsmitteilung Nr. 24, IMW Clausthal 1999



**Bild 6:** Extrem beschädigte Kugeln nach einer Lastwechselzahl von ca. 23 Mio.



**Bild 7:** Pitting und Kantenabbrüche der Kugellaufbahnen im Gelenkstück nach ca. 23 Mio. Lastwechseln



**Bild 8:** Kantenabbrüche am Käfig nach einer Lastwechselzahl von ca. 23 Mio.



**Bild 9:** Kantenabbrüche in der Kugelnabe nach einer Lastwechselzahl von ca. 23 Mio.

# Gray correlation of speckled high resolution images: an approach to precise deformation measurements with MATLAB

Käferstein, B.

*Die Grauwertkorrelation arbeitet mit dem Vergleich von Aufnahmen unterschiedlicher Verformungszustände. Sie bedient sich hochauflösender Kameras und der rechnergestützten Bildverarbeitung. Um die Verformungsvektoren eines Bauteils berechnen zu können, wird eine kleine, aber eindeutig definierte Bildregion vor der Verformung ausgewählt und in der Aufnahme des verformten Prüflings wieder ausfindig gemacht. Der Vergleich wird auf Basis eines Korrelationsverfahrens durchgeführt. Mit zusätzlichen Interpolationstechniken und hochauflösenden Kameras kann eine Auflösung bis zu 1/10000 des Bildausschnittes erreicht werden. Anwendungen sind die Messung plastischer Verformungen oder das Verfolgen von Objekten in Bildsequenzen.*

*The gray correlation technique works on the comparison of pictures of different deformation shapes. It uses high resolution cameras and computer aided image processing. In order to calculate the displacement field of a specimen, a small but unique region of the object is selected before applying distortion. This area is searched again in the picture of the deformed component. The comparison is based on correlation algorithms. With additional interpolation techniques and high-definition cameras, a resolution up to 1/10000<sup>th</sup> of the section can be reached. Applications are the measurement of plastic deformation or the tracking of objects in picture sequences.*

## 1 Introduction

### 1.1 The qualified development tool

It was necessary for the rapid development of the correlation algorithms to use a special computing environment. MATLAB from The Math Works Inc. is installed on the IMW computer systems and has an easy to learn programming interface. It has its own high-performance language similar to C or Pascal for technical computing with predefined algorithms for numerical and large scale matrix operations. The name MATLAB is an acronym for 'matrix laboratory' and features a family of application-specific solutions called toolboxes [1]. Famous

areas in which MATLAB toolboxes apply are signal processing, control system design, neural networks, fuzzy logic and simulation.

### 1.2 The basics of correlation techniques

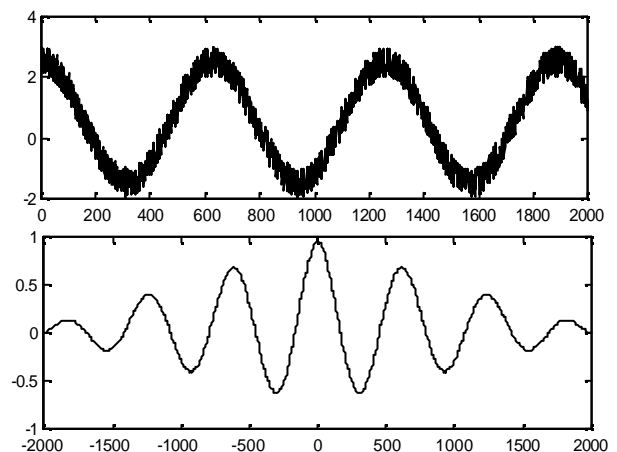
The correlation describes the similarity of objects. The auto correlation is a measure for the self similarity and the cross correlation is a maximum if two objects are nearly identical. For two non-periodic stationary random signals one can define the cross correlation as the scalar product of the reference signal  $x$  and the shifted signal  $y$ , [2]:

$$c_{xy}(m) = \sum_{n=0}^{N-|m|-1} x_n \cdot y_{n+m} \quad \text{Eq. 1}$$

Apparently the cross correlation is maximum if  $x$  and  $y$  have the same sign (phase) and change in the same periodic manner (frequency). Substituting  $x$  for  $y$  leads to the auto correlation:

$$c_{xx}(m) = \sum_{n=0}^{N-|m|-1} x_n \cdot x_{n+m} \quad \text{Eq. 2}$$

Cross correlation and auto correlation depend on the shift  $m$  and are also vectors like  $x$  and  $y$ .



**Figure 1** Vibration signal disturbed by random noise (top) and auto correlation (bottom)

**Figure 1** shows a harmonic vibration disturbed by white noise. The adjacent graph shows the auto correlation signal, which has the same frequency. It is unity if the shift  $m$  is zero. The noise in the signal does not appear regular and with stable phase and



is thus eliminated. Correlation can be used to separate deterministic signals from random signals.

Additionally there is another singleton parameter which is used to measure deviation. The correlation coefficient  $r$  is known from curve fitting and least squares approximations and is applicable for signals and matrices of any dimension.  $R$  is similar to the standard deviation,  $/3/$ :

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (X_{mn} - \bar{X}) \cdot (Y_{mn} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (X_{mn} - \bar{X})^2 \cdot \sum_m \sum_n (Y_{mn} - \bar{Y})^2}} \quad \text{Eq. 3}$$

It can be seen that **Eq. 3** refers to the interdependencies of two matrices depending on the individual scattering of each matrix. If both matrices have already high standard deviations the correlation coefficient will be small. The correlation coefficient fits best the requirements and will therefore be used in the core algorithm of the programme.

## 2 The algorithm

### 2.1 Description

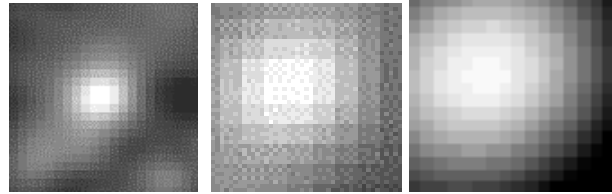
The algorithm itself is quite easy. A predefined section around a specified point of the picture before deformation is selected. A second section of the same size at the same position in the deformed picture is taken and the correlation coefficient is calculated and stored in a matrix **R**. The second section will be moved circularly around the specified point till a preselected search area is completely scanned. The position of the maximum correlation coefficient in the correlation matrix leads to the deformation vector in pixels. Using not only one point but a complete grid of points makes it possible to calculate displacement fields and strain distributions. The scale of the object is determined by a metre which was photographed together with the specimen. Now the measurements can be calibrated in metric units.

### 2.2 How to get sub pixel resolution

In order to overcome the fixed resolution of the camera a special interpolation method is used. However the camera has a horizontal resolution of more than 2000 pixels it is sometimes necessary to increase the accuracy by a factor up to ten.

**Figure 2** shows an approach with bicubic spline interpolation. The correlation coefficient is a local peak function around the best fitting position where both sections are coincident. This maximum with its

small surrounding area is cut out and interpolated to increase calculation speed and resolution. The interpolation with a bicubic surface of a finer mesh leads to a new position for the correlation maximum between the original pixels. As the bicubic surface has a limited number of parameters it's necessary to increase the number of input pixels if someone wants to increase the resolution. In practise the upper limit is a fifth of the camera resolution.



**Figure 2** Correlation coefficient matrix. Original state with local maximum (left); zooming in shows the resolution limited by the camera (middle); interpolation by a factor of 2 increases the resolution beyond the physical pixel number (right)

### 2.3 The Implementation

The core function is the gray value correlation 'gwkcac.m' which reads in the coordinates of the evaluation points and does the calculation of the coefficient  $r$ . Interpolation, picture display, grid overlay and vector output are the main tasks.

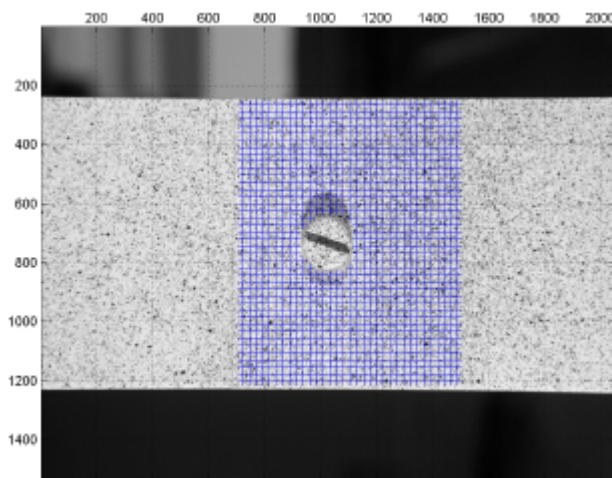
As the system can be used for displacement field analysis and object motion tracking there are two different kinds of input modules for acquiring the evaluation points. 'gmkmeasurepoints.m' displays a picture of the object and reads interactively measurement points from the graphical user interface via the mouse pointer, **Figure 3**. 'gwkmesh.m' reads a black and white picture, **Figure 4**, that serves as a mask to define the region of interest, where a Cartesian mesh is automatically created, **Figure 5**.



**Figure 3** Points which shall be tracked are selected manually /4/



**Figure 4** Masks are used to exclude regions which are not of interest (black)



**Figure 5** Automatic generated mesh using gwkmesh and the predefined mask

The 'gwksettings.m' procedure contains all important preferences like search area, mesh refinement and interpolation options, file names and paths.

In order to display displacement fields and trajectories of points the 'gwkgraph.m' function was implemented. It is used for simultaneous display of contour plots and image data.

The 'gwk.m' is the main program and controls all activities including calculation, scaling to engineering units, output and video sequence generation.

There are a lot of additional helping functions i.e. for MPEG movie conversion, rigid body movement and blur compensation, assemble modules to get animated pictures of the load test, calculation of derivatives, acceleration and trajectories. It is worth mentioning that the 'open' architecture of MATLAB was useful in adapting special graphic functions for own purposes.

## 2.4 Speed and memory considerations

Unfortunately the calculation of the correlation coefficient depends on the search area and the compared section. If the search distance or the section size is doubled the calculation time is fourfold to the previous speed. Additionally all variables have to be cleared manually because MATLAB has no system memory management. In fact the calculation of the aluminium beam in **Figure 7** took more than five hours and 500 MB memory. For this reason some tricks are applied:

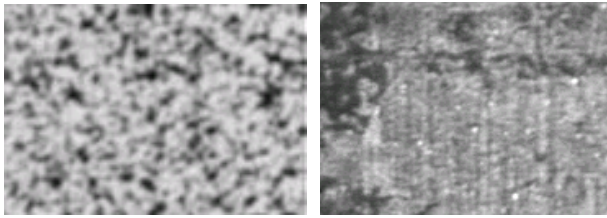
- Large scale rigid body movement must be automatically compensated for at least one reference point. Assume for example a rigid body movement of 10 pixels and a deformation of 5 pixels maximum. Without compensating rigid body movement every evaluation point would need  $15 \times 15 = 225$  calculation runs. If we confine ourselves only to deformation analysis there are  $5 \times 5 = 25$  steps left. That is eight times faster than before!
- The calculated displacement field is assumed continuous so the grid of the evaluation points and the displacement vectors can be interpolated in the same manner like the correlation coefficient matrix.

## 3 The Application fields

The application fields of the system depend on the required resolution. In contrast to other measurement application the resolution of the gray correlation is relative and not fixed. Speckle interferometry for example has a maximum measuring range of about 50 microns, independent of the object size. The gray correlation can measure  $1/2000^{\text{th}}$  of the object size. That can be  $1/1000^{\text{th}}$  mm if used with a microscope or 1 cm if used in crash analysis of cars. The transition is fluent, but gray correlation is mainly used in plastic deformation analysis where other methods fail.

### 3.1 The required surface texture

The correlation is unequivocal if the surface has a random texture. As any regularity or symmetry leads to ambiguities it is not recommended to use gratings or crosses as markers. However sand-blasted, ground or lacquered surfaces have often a suitable quality, **Figure 6**.



**Figure 6** A speckled and a ground surface

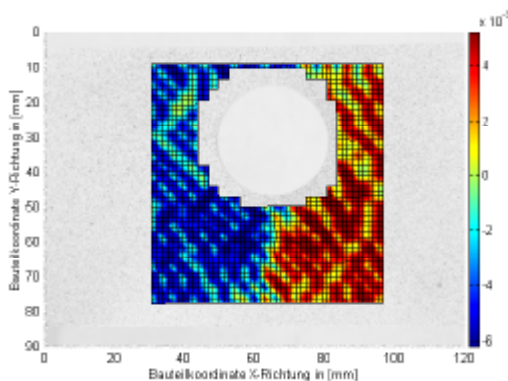
Similar to laser speckle interferometry coherent light can be used to produce a high resolution random texture on objects. Unfortunately decorrelation effects occur due to the change of the illumination direction when the test specimen undergoes deformation. Best results are obtained by careful preparation from far distance with spray cans. To increase the background contrast a white chalk paint can be applied first.

### 3.2 Strain and deformation measurement

If the whole deformation field is measured the strain distribution can be derived by calculating the potential gradient with a build-in MATLAB function.

#### 3.2.1 Elastic strain of thermosetting plastic

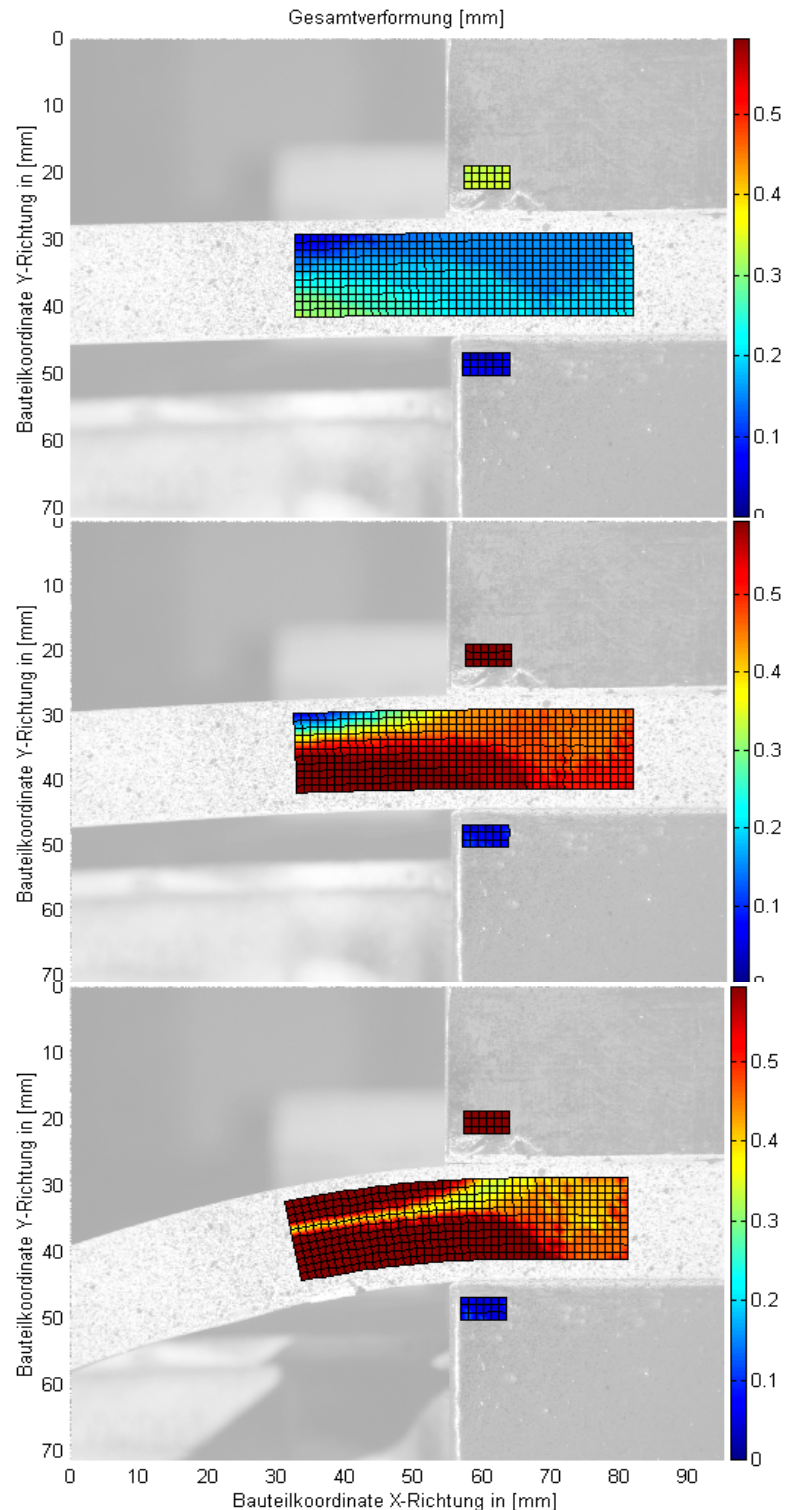
An Araldit (Epoxy resin) plate with an eccentric hole as notch was mounted in a tensile tester. A load was applied in horizontal direction. The deformation was in the elastic range. **Figure 8** shows the yield strain distribution in a selected area around the hole. The spots and discontinuities in the strain distribution indicate that the resolution of the displacement is too small. The overall values reach the lower boundary of the systems capacity.



**Figure 8** Elastic strain of a tensile specimen made of Araldit with eccentric hole

#### 3.2.2 Plastic deformation measurement

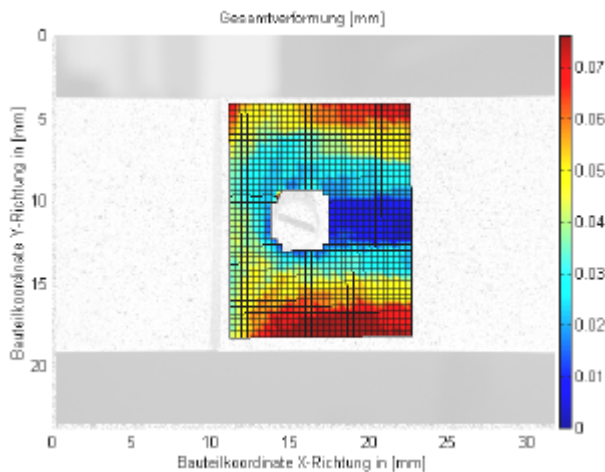
The picture sequence in **Figure 7** shows the bending of a aluminium bar that is clamped in a chuck block. The measurement areas are selected by a mask file. The yield displacement in millimeters is coded in the coloured plot. The small measurement area on the upper jaw shows that it is pushed upward. The neutral fibre forms near the middle of the



**Figure 7** Bending sequence of a plastic deformed and clamped aluminium bar



beam. Even if the displacement is very large, the system is able to follow the specimen. The measurement grid is deformed continuously and undergoes also distortion. Additional points between the grid were calculated with a bicubic spline algorithm to increase the resolution. The patch graphic objects were smoothed with Gouraud shading to obtain a soft light and transition effect for visualization. The background is tinted and shows the current photographs of the deformed shape.

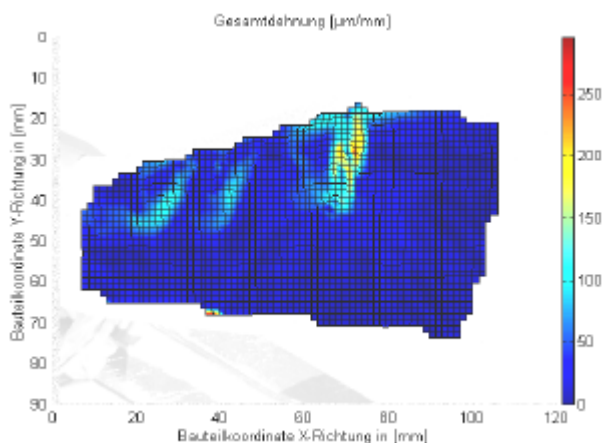


**Figure 9** Remaining deformation of a tensile specimen with screw joint

**Figure 9** shows the deformation of two screwed sheet metal stripes under tension. Local plasticization can be detected around the screw.

### 3.2.3 Detecting flaws of a pressure vessel due to varying wall thickness

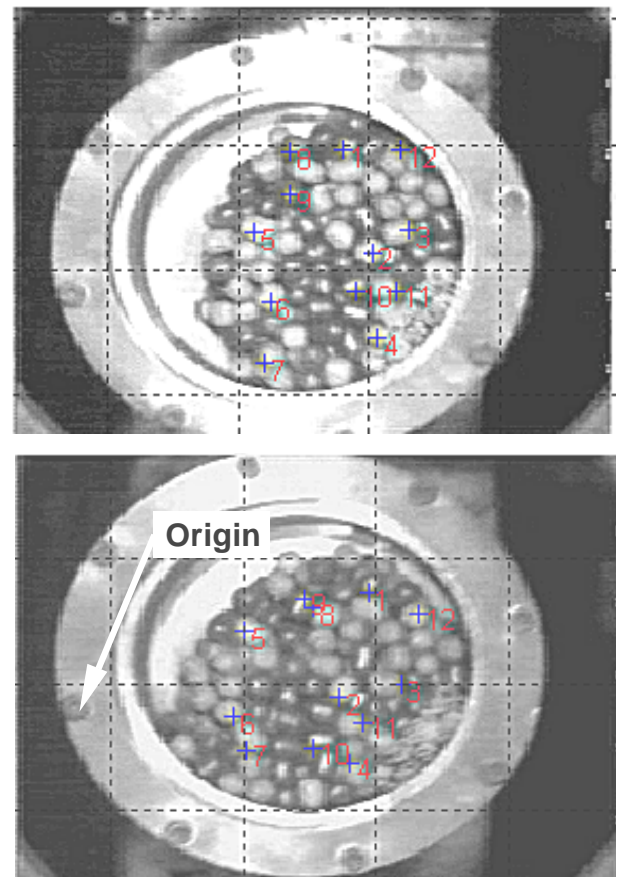
Image correlation can be used to detect flaw in pressure vessels, provided that the deformation is large enough. **Figure 10** shows a plastic vessel with thinned areas in the wall. The regions in the upper half can be identified due to large strains.



**Figure 10** Plastic tank with internal pressure and flaws (just before detonation)

### 3.3 Tracking of objects and determination of kinematic and kinetic parameters

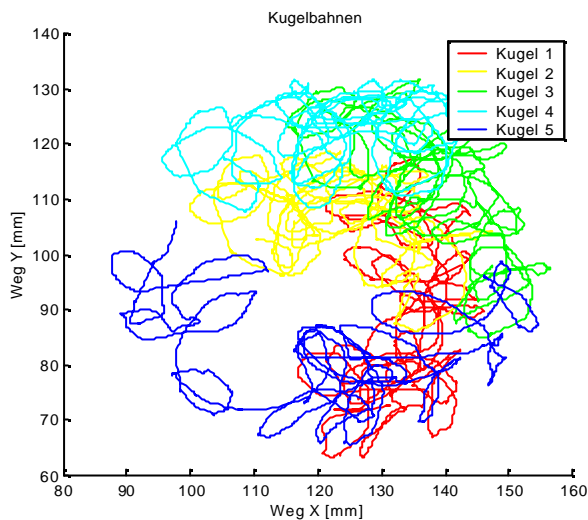
If someone has to measure kinematics the gray value correlation gives an excellent support. The tracking of objects is as easy as the calculation of deformations. Instead of a whole grid the tracking procedure uses a list of single point coordinates. Movie sequences can be evaluated if they are available as MPEG files or as single picture sequences of a common file format. **Figure 11** shows a high-speed record of a vibrating ball mill. The movie was transferred from tape to MPEG with a frame grabber video card. The charge consists of coloured metal balls. In order to increase crushing performance the impact energy of the balls has to be optimised. The first step is to calculate the trajectories. Every discontinuity in the trajectory is a hint to an impact event.



**Figure 11** High speed picture sequence of the charge in a vibrating ball mill

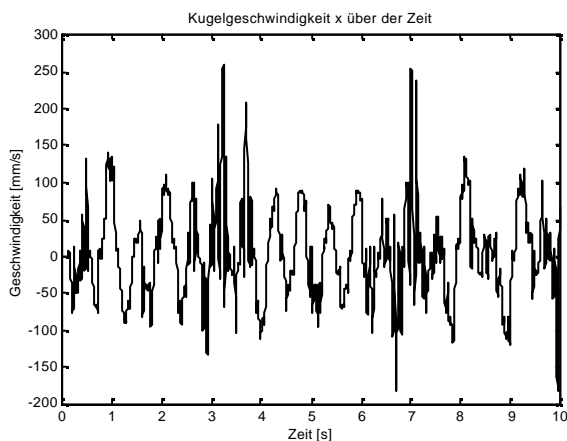
When the time spacing of the frames is equal, the speed and acceleration of the individual balls can be obtained by differentiating the trajectories.

A big disadvantage of the MPEG standard is that it uses lossy compression. Areas in the pictures which move less than a certain limit are assumed to be fixed and the velocity starts to leap.

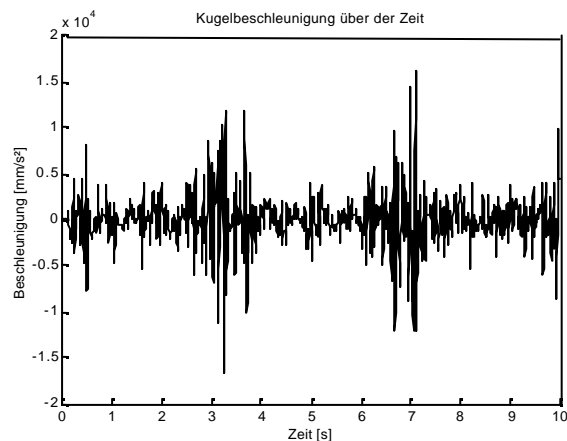


**Figure 12** Motion study of the first five selected balls

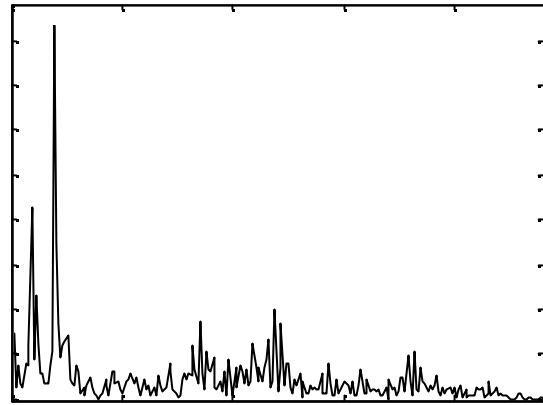
If a ball changes his direction rapidly, **Figure 12**, it probably just bumped against a neighbour or the wall. The mill container itself is following an elliptical trajectory which was eliminated by the rigid movement compensation algorithm. The Origin was set to a head screw on the front, Figure 11.



**Figure 13** Speed in x direction of ball No. 1



**Figure 14** Acceleration in x direction of ball No. 1

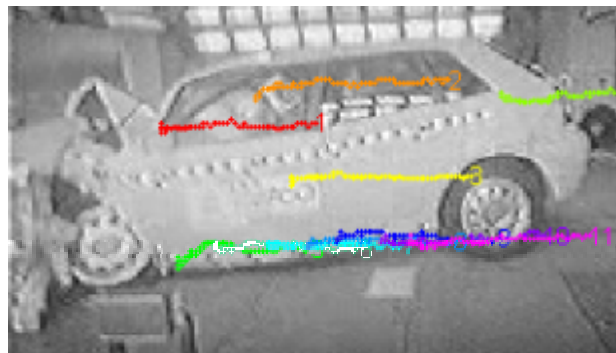


**Figure 15** Qualitative Fast-Fourier-Transform derived from the speed of ball No. 1

**Figure 13 to Figure 15** show derived kinematic parameters.

### 3.3.1 Crash test measurements

The point tracking method can be used in crash test evaluation, too. **Figure 16** shows that even coarse an low resolution MPEG videos give satisfying results.



**Figure 16** Trajectories of points on a car body during a crash test

## 4 References

- /1/ The MathWorks, Inc.: Using MATLAB. Version 5, Natick, Massachusetts, USA, 1999
- /2/ Lücke, H. D.: Signalübertragung. Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1999
- /3/ The MathWorks, Inc.: Image Processing Toolbox. Users Guide Version 2.2, Natick, Massachusetts, USA, 1999
- /4/ Internet-Seite der Fa. A&O Autoversicherung Oldenburg AG: <http://www.a-und-o.de/supert.html>, Crashtest-Video audia3ct.mpg, Nov. 2000
- /5/ Kieselstein, E. et al.: Einsatz der Grauwertkorrelation zur Charakterisierung von Faserverbundwerkstoffen. DVM-Tagung Werkstoffprüfung, Bad Nauheim, Dec. 1996

# Prüfstandskonzept zur mechanischen Bauteilprüfung

Birkholz, H.; Garzke, M.

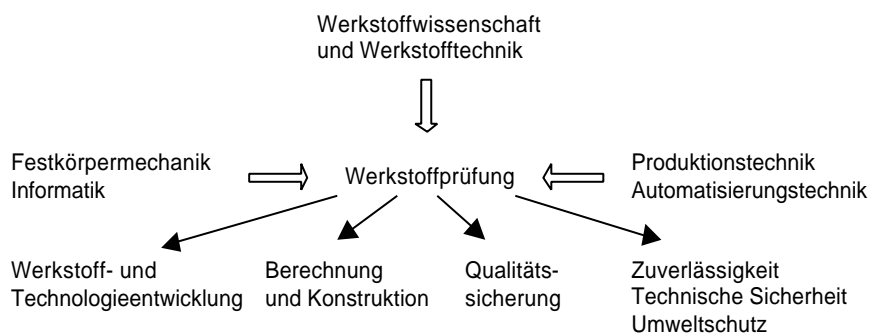
*Die Neuentwicklung eines Prüfstandes zur kombinierten Torsions- und Biegemomentbelastung erfordert einige grundsätzliche Überlegungen zur Krafteinleitung in das Prüfteil sowie zum Antrieb des Prüfstandes.*

*A test-rig-design for combined torque and bending moment loads requires some basic thoughts on drive and force application.*

## 1 Ziele und Aufgaben

Das Prüfen von Werkstoffen sowie daraus gefertigter Produkte hat große Bedeutung für die Eigenschaftsoptimierung, den rationellen Werkstoffeinsatz, das Qualitätsmanagement und die technische Sicherheit. Da ein Werkstoff während des gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung in enger Wechselwirkung mit der Umwelt steht, sind auch das Bewerten der Umweltverträglichkeit und der Recycling-Fähigkeit wichtige Anliegen /3/.

Die Werkstoff- und Bauteilprüfung ist Bestandteil von Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik: ihre Verbindung zu anderen Gebieten der Ingenieurwissenschaft zeigt **Bild 1**.



**Bild 1:** Werkstoffprüfung

Fast alle Verfahren der Werkstoffprüfung kommen in allen Phasen der folgenden Kette

Werkstoff → Halbzeug → Bauteil (-element)  
→ Baugruppe → System

zur Anwendung. Sie werden häufig miteinander kombiniert, um eine umfassende Aussage über die Eigenschaften bzw. das Gebrauchsverhalten der

Werkstoffe unter Einsatzbedingungen zu erhalten. Dabei lassen sich vier Aufgabenbereiche unterscheiden:

- Die Werkstoffdiagnostik,
- die Eigenschaftscharakterisierung,
- die Qualitätsprüfung und
- die Zuverlässigkeits- und Schadensanalyse.

Am Institut für Maschinenwesen existieren für diese Aufgaben u.a. drei Torsionsschwingprüfstände, die allerdings in der Prüffrequenz auf maximal 8,5 Hz limitiert sind /7, 8/. Bei einer geforderten Mindestlastspielzahl von  $10^7$  Lastwechseln ergeben sich Prüfzeiten von ca. 2 Wochen. Es bestand daher die Aufgabe, einen neuen Prüfstand zu entwerfen, der kürzeren Prüfzyklen gerecht wird. Gleichzeitig soll mit allen Prüfständen die Abarbeitung der umfangreichen Testaufgaben sicherstellt werden.

## 2 Prüfeinrichtungen

Zu den Prüfeinrichtungen gehören Werkstoffprüfeinrichtungen und Prüfanlagen. Werkstoffprüfmaschinen sind nach DIN 51220 Maschinen und Geräte, mit denen durch mechanische Beanspruchung

Eigenschaftswerte an Proben, Formelementen, Bauteilen und Bauteilgruppen ermittelt werden.

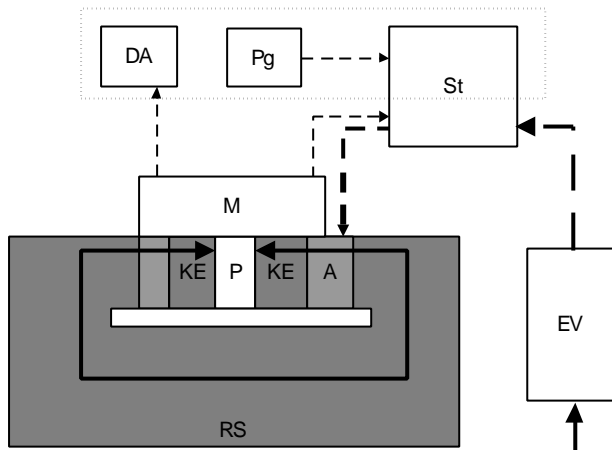
Nicht unter diese Definition fallen demnach z.B. Maschinen und Geräte zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, zur Verschleißprüfung, zur Korrosionsprüfung, und zur abschließlichen Funktions-

prüfung an Bauteilen und Bauteilgruppen [DIN 51220].

Nach /4/ liegt der Unterschied zwischen Werkstoffprüfmaschinen und Prüfanlagen darin, daß Prüfmaschinen Prüfsysteme mit fester räumlicher Anordnung der kraftführenden Teile sind und Prüfanlagen Prüfsysteme mit von Versuch zu Versuch veränderlicher räumlicher Anordnung der kraftführenden Teile sind.

## 2.1 Aufbau einer Prüfeinrichtung

Ein Prüfsystem setzt sich nach /4/ und /5/ aus folgenden unerläßlichen Teilsystemen zusammen: mindestens zwei Krafteinleitungen, einem Antrieb, einer Steuerung, einer Reaktionsstruktur, einer Energieversorgung, Messgeräte, einer Datenausgabe und einer Programmierung, siehe **Bild 2**. Andere Teilsysteme, die nur temporär verwendet werden, und deren Aufgaben und technische Eigenschaften verschiedenartig sein können, werden als Zusatzgeräte bezeichnet. /2/.



P= Probe; KE= Krafteinleitung; A= Antrieb; RS= Reaktionsstruktur; St= Steuerung; EV= Energieversorgung; Pg= Programmierung; M= Meßgeräte; DA= Datenausgabe  
Linien: dick= kraftführend / energieführend; dünn= informationsführend

**Bild 2:** Prinzipieller Aufbau einer Prüfeinrichtung /4/

Nachfolgend werden die oben genannten Begriffe (aus **Bild** ) erläutert. Die hier gewählte Reihenfolge hat ihre Logik, indem ausgehend von den mit der Probe im Kontakt stehenden zu den peripheren Teilsystemen vorgegangen wird /4/:

- Um die bei der mechanischen Verformung der Probe entstehenden Reaktionen zu überwinden, müssen die erforderlichen Kräfte und/oder Momente an mindestens zwei Stellen durch **Krafteinleitungen** an die Probe übertragen werden.
- Um die zur Verformung erforderliche Energie auf die Probe übertragen zu können, muß ein **Antrieb** mindestens eine Krafteinleitung gegenüber den anderen in Relativbewegung versetzen.
- Um eine kontrollierte Verformung der Probe zu ermöglichen, muss die Energiezufuhr zum Antrieb durch eine **Steuerung/Regelung** beeinflusst werden können.
- Um die bei der Prüfung entstehenden Reaktionen aufzunehmen, müssen sich alle nicht rein

dynamisch angetriebenen Krafteinleitungen – wo vorhanden, über deren Antriebe – auf eine gemeinsame **Reaktionsstruktur** abstützen.

- Um der Probe die zu ihrer Verformung erforderliche Energie zuführen zu können, muß der Antrieb von einer **Energieversorgung** gespeist werden.
- Um die Tauglichkeit der von der Probe repräsentierten Objekte für den Gebrauch zu ermitteln und um der Steuerung die nötige Information über den Ist-Zustand der Probe zu liefern, müssen **Messgeräte** die relevanten Versuchsparameter erfassen.
- Um die Tauglichkeit der von der Probe repräsentierten Objekte für den Gebrauch zu ermitteln, müssen die von den Messgeräten erfassten Daten **gespeichert** werden.
- Um der Steuerung den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Zustand der Probe zu ermöglichen, muß eine **SPS** die nötigen Soll-Daten liefern.

## 2.2 Krafteinleitung

Die Krafteinleitung ist das Teilsystem, das unmittelbar auf die Probe einwirkt, und jeder Fehler, der bei seiner Konstruktion oder Anwendung begangen wird, trägt potentiell die Möglichkeit eines falschen Resultats der Prüfung in sich. Das tückische an solchen Fehlern ist die Tatsache, daß sie immer wieder neu begangen werden, selbst wenn das Wissen um ihre Möglichkeit bekannt ist. Dieser Sachverhalt kommt nicht von ungefähr, weil das Entstehen der erwähnten Fehler oft unbemerkt bleibt, sofern nicht offensichtliche funktionelle Mängel auftreten oder durch geeignete Mittel das Bestehen von Unstimmigkeiten aufgedeckt wird. Diese Feststellung behält ihre volle Gültigkeit auch dann, wenn die verwendeten Geräte regelmäßig kalibriert und für gut befunden werden /4/. Vielfach handelt es sich um Mängel, die unter den genormten Bedingungen der Kalibrierung nicht in Erscheinung treten, die praktische Prüfung – beispielsweise an einem Bauteil – aber nachhaltig beeinflussen /2/.

Die Krafteinleitung bei dem zu entwickelnden Prüfstand in die Welle-Nabe-Verbindung kann auf folgende unterschiedliche Arten geschehen:

- Polygonprofil,
- Zahnprofil,
- Keilprofil,
- Korbzahnprofil

Das Polygonprofil ist aufgrund der geringen Flächenpressung zur Übertragung kleiner bis mittlerer Biegeelastanteile gut geeignet, wobei jedoch unbedingt auf extrem steife Nabengestaltung mit großem Außendurchmesser und mittlerer Verbindungslänge geachtet werden muß, um den auftretenden Reibverschleiß, der besonders stark durch die elastischen Nebenaufweitungen beeinflusst wird, in Grenzen zu halten /1/.

Für dynamische Torsionslasten gilt es, eine spielfreie Polygonverbindung zu verwenden, da eine spielbehaftete Verbindung zu extremen Gleitbewegungen führen würde, und damit ein hoher Reibverschleiß die Folge wäre.

Vorteil eines Polygonprofils (z.B. eines P3G-Profils) ist, daß Innen- und Außenkontur durch Schleifen herzustellen sind, und dadurch eine sehr genaue Fertigung gehärteter Oberflächen möglich ist.

Die Zahn-, Keil- und Kerbzahnprofile zeigen bezüglich ihres Verhaltens bei unterschiedlicher Nabengeometrie prinzipiell ähnliche Eigenschaften, so daß die wichtigsten Gestaltungshinweise für diese Profile gleichermaßen gelten.

### 2.3 Auswahl der Krafteinleitung

Die hohe Belastung des Prüflings (Welle-Nabe-Verbindung) durch das dynamische Drehmoment führt zu einer sehr großen Flächenpressung an den Krafteinleitungsstellen des Prüflings (bei den o.a. Verbindungen). Allein dieser Umstand verlangt eine spielfreie Verbindung. Kleinste Passungsfehler werden durch die hohe Belastung der Verbindung zu stark fortschreitendem Verschleiß führen, und somit die eingestellte Amplitude der dynamischen Torsion verändern. Das führt zu einem abklingenden Drehmoment und somit zu einer Verfälschung des Versuchsergebnisses, ein Verhalten, welches grundsätzlich bei weggesteuerter Belastung auftritt. Durch das Aufkleben von DMS, die Wahl einer geeigneten Steuerung und damit der Realisierung einer momentgesteuerten Lastaufgabe kann dem Abfallen der Belastung theoretisch entgegengewirkt werden. Die Auswahl eines der o.g. Krafteinleitungssysteme führt also zu sehr geringen Fertigungstoleranzen, vor allem auch bei den Prüflingen, was eine deutliche Verteuerung der einzelnen Versuchsreihen zur Folge hat.

Eine reibschlüssige Verbindung hat z.B. bei der Verwendung eines Spannfutters den Vorteil, als dass Proben mit verschiedenen großen Durchmessern in ein- und derselben Spannvorrichtung einge-

spannt werden können. Extreme Durchmesser-schwankungen können durch ein adaptives Spannsystem bewältigt werden, welches als Zulieferteil bezogen werden kann. Von Nachteil ist u. U. eine zu geringe Flächenpressung, wodurch die Drehmomentübertragbarkeit beschränkt werden kann.

Ringfederspannelemente ermöglichen höhere Flächenpressungen und sind damit zur Übertragung größerer Kräfte an Welle-Nabe-Verbindungen geeigneter. Durchmesserunterschiede der Prüflinge können durch geteilte Hülsen ausgeglichen werden. Die Kosten und der Fertigungsaufwand dieser Hülsen bleiben in einem vertretbaren Rahmen, wodurch die Wahl auf ein Ringfederspannelement fällt.

### 3 Antrieb und Steuerung

Der Antrieb und die dazugehörige Steuerung bestimmen weitgehend die Leistungsfähigkeit eines Prüfsystems. Neben der Charakterisierung des Antriebs nach der Geometrie der Bewegung sind auch folgende Kriterien bedeutsam /4/:

- **Richtung:** Der zu verwendende Antrieb muß aufgrund der dynamischen Torsion doppelwirkend sein, um die Entfaltung der Prüfkraft / des Prüfmoments in zwei Richtungen zu ermöglichen
- **Lastspielzahl:** Der Antrieb muß für wiederholte Belastungen ausgelegt sein, also um Ermüdungsversuche durchführen zu können
- **Höchstbelastung**
- **Arbeitshub**
- **Programmierbarkeit:** Gemeint ist die Eignung zur automatischen Durchführung verschiedenartiger Versuchsabläufe, die innerhalb dieser Arbeit keine Berücksichtigung finden soll.

Nach /4/ muß ein Antrieb von Werkstoffprüfmaschinen wenigstens eine der folgenden Bedingungen erfüllen, um seine Tätigkeit effizient erfüllen zu können. Die zutreffenden Bedingungen sind mit einem „+“ gekennzeichnet.

- Die Belastung der Probe muß von Null aus ansteigend bis zu einem Höchstwert mit möglichst geringer Stoßwirkung und stufenlos aufgebracht werden können (z.B. Zug-, Druck-, Biege-, Verdreh-Prüfmaschinen).(+) )
- Die auf die Probe aufzubringende Kraft muß in bestimmten Stufen wählbar sein und mit möglichst geringer Stoßwirkung aufgebracht wer-

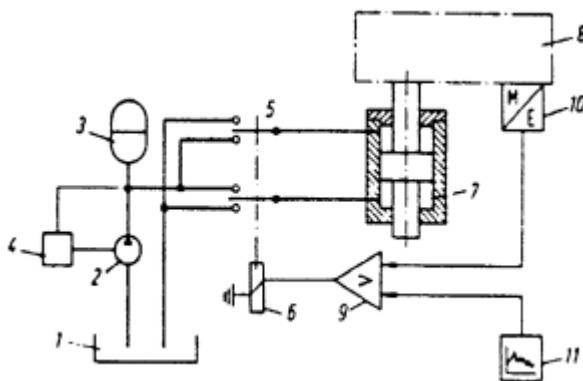
den können (z.B. Härteprüfgeräte, Zeitstandprüfmaschinen).(+)

- Die schwingende Belastung der Probe muß zwischen beliebigen Grenzwerten gesteuert werden können (z.B. Dauerschwingprüfmaschinen).(+)
- Die wiederholten Belastungen der Probe müssen in ihrem zeitlichen Ablauf gesteuert werden können (z.B. Prüfmaschinen für Schwingversuche).
- Die für die Belastung der Probe vorgesehene mechanische Arbeit muß einstellbar sein (z.B. Pendelschlagwerke, Fallwerke).

### 3.1 Antriebsarten

Die am häufigsten in Prüfsystemen zur Verwendung kommenden Antriebsarten werden hier kurz vorgestellt:

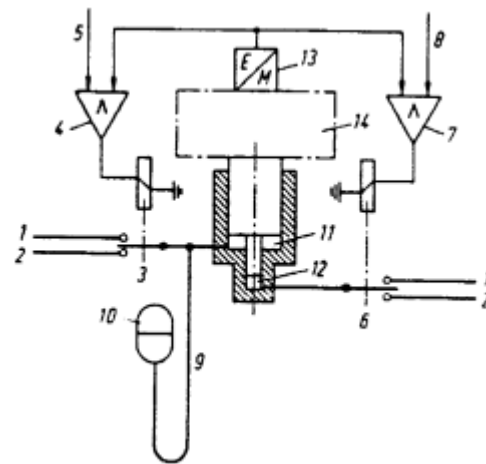
**Hydraulische Antriebe:** Als hydraulisch gilt ein Antrieb, dessen energietragendes Medium eine im wesentlichen inkompressible Flüssigkeit (meist Hydrauliköl) ist. Heute wird hauptsächlich zwischen servohydraulischen (vgl. **Bild 3**) und servohydraulischen Resonanzantrieben (vgl. **Bild 4**) unterschieden.



1=Reservoir; 2=Pumpe; 3=hydropneumatischer Druckspeicher; 4=Pumpenregelung; 5=Regelventil; 6=elektromagnetische Ansteuerung des Ventils; 7=Zylinder; 8=übriges Prüfsystem mit Probe; 9=Regelverstärker; 10=Istwert-Geber f. d. Regelgröße; 11=Sollwert-Geber f. d. Regelgröße

**Bild 3:** Prüfstand mit servohydraulischem Antrieb /4/

Der Servohydraulische Antrieb (oder auch Servohydraulik) ist ein Antriebskonzept, das über eine fast unbegrenzte Programmierbarkeit verfügt. Die Servohydraulik ist heute der flexibelste Antrieb für Prüfsysteme.



1=Anschluß an Druckspeicher; 2=Anschluß an Reservoir; 3,4,5=Ventil, Verstärker u. Sollwert-Eingang f. Regelung d. stat. Kraftanteils; 6,7,8=Ventil, Verstärker u. Sollwert-Eingang f. d. Erregung d. Resonanzschwingung; 9=Rohrleitung mit als schwingender Masse dienender Ölsäule; 10=Druckspeicher; 11=Zylinder; 12=Erreger-Zylinder; 13=Istwert-Geber f. d. Regelgröße; 14=übriges Prüfsystem mit Probe

**Bild 4:** Prüfstand mit servohydraulischem Resonanzantrieb /4/

Der Servohydraulische Antrieb (oder auch Servohydraulik) ist ein Antriebskonzept, das über eine fast unbegrenzte Programmierbarkeit verfügt. Die Servohydraulik ist heute der flexibelste Antrieb für Prüfsysteme. Mit ihrer universellen Programmierbarkeit und ihrer Fähigkeit, prinzipiell vom Standversuch bis zu hochfrequenter Ermüdung fast jeden Versuchsablauf zu meistern, nimmt die Servohydraulik eine privilegierte Stellung ein. Es ist jedoch zu bemerken, daß der Energieverbrauch hierbei einen erheblichen Anteil der Versuchskosten verursacht. Dazu kommt, daß die aufgewendete Energie letztlich zur Erwärmung von Öl dient, dessen Kühlung u.U. beträchtliche Entsorgungskosten bedingt. Es wird zwischen einfachwirkender und doppeltwirkender Servohydraulik unterschieden.

Der Resonanzantrieb wird unter dem Begriff „Servohydraulischer Resonanzantrieb“ als spezielle Antriebsart angesehen, obwohl er an ein und demselben Prüfsystem durch relativ einfache Umschaltoperationen im Wechsel mit normaler Servohydraulik angewendet werden kann. Das Grundprinzip der einfachwirkenden Variante des servohydraulischen Resonanzantriebs stellt Bild 4 dar /4/.

**Elektromechanische Antriebe:** Sie bestehen zur Hauptsache aus mechanischen Elementen, die aber durch einen nichtmechanischen (elektrischen) Primärtrieb in Bewegung gesetzt werden.

Das Prinzipschema eines mit Servosteuerung ausgerüsteten elektromechanischen Antriebs üblicher



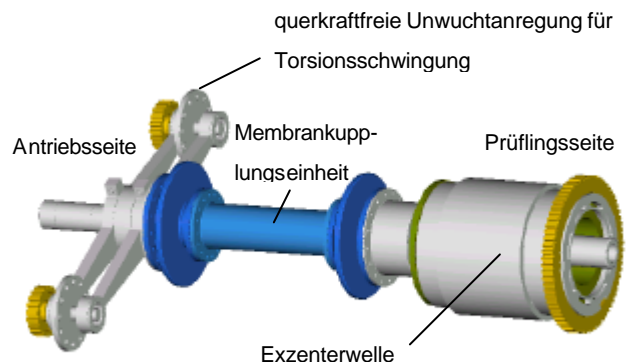
**Bild 5:** Prüfstand mit elektromechanischem Antrieb  
/4/

**Elektromagnetische Antriebe:** Als elektromagnetisch wird ein Antrieb bezeichnet, bei dem die von einem Elektromagneten auf einen eisernen Anker oder auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkende Kraft ohne wesentliche Zwischenglieder zur Bewegung einer Krafteinleitung verwendet wird.

Antriebsleistung unvermeidlich wird. Damit ist der elektromagnetische Antrieb prädestiniert für die hochfrequente Ermüdungsprüfung mit kleinen Schwinghüben.

Die oben beschriebenen Vorzüge eines servohydraulischen Antriebs werden für das zu entwickelnde Prüfsystem nicht in vollem Umfang benötigt. Auch der sehr hohe Energiebedarf und das Problem der Kühlung weisen auf ein wirtschaftlich geeigneteres Antriebskonzept. Der elektromagnetische Antrieb ist zu unflexibel, was die Amplituden des dynamischen Drehmoments betrifft, und zu kompliziert für das Aufbauen eines umlaufenden Biegemoments. Daher fällt die Auswahl nicht nur aus Kostengründen auf ein elektromechanisches Antriebssystem. Es sind auch seine Flexibilität, sein geringerer Energiebedarf und nicht zuletzt sein verhältnismäßig einfacher Aufbau, die in diesem speziellen Fall für dieses System sprechen.

Am IMW ist ein Prüfstandskonzept erarbeitet worden, welches die Prüfung von Bauteilen unter Torsions- und Biegemomentenbelastung bei hohen Prüffrequenzen ermöglicht /6/. Eine Prinzipskizze der Antriebseinheit zeigt **Bild 6**.

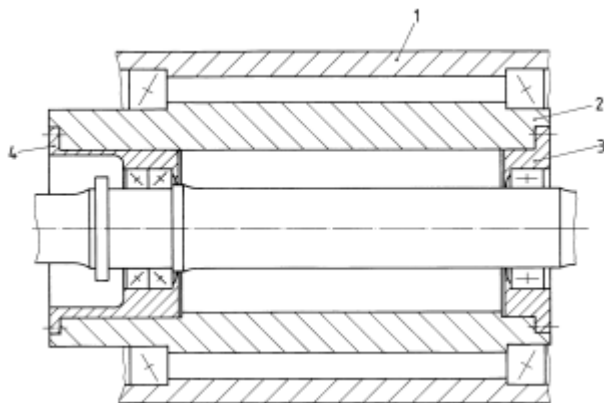


Die Realisierung der Torsionsschwingung erfolgt über eine elektromechanische Anregung derart, dass ein Elektromotor über eine biegsame Welle und einen Zahnriementrieb, zwei um  $180^\circ$  versetzte Unwuchtmassen in Bewegung setzt. Der Zahnriementrieb dient dabei der Synchronisierung der beiden Unwuchtmassen. Die Unwuchtmassen werden von einem Schwingerjoch getragen, welches mit dem Wellenstrang ein schwingfähiges Feder-



Masse-System bildet. Der Vorteil dieser Schwingungsanregung liegt im Gegensatz zu der am Institut bereits vorhandenen Hebelumlenkung in der spielfreien Lastaufgabe besonders bei Spannungsverhältnissen im Bereich  $-\infty < R < 0$ . Diese Art der Drehmomenterzeugung hat sich in verschiedenen anderen Fällen als leistungsfähig erwiesen /9/.

Das Biegemoment resultiert aus einer exzentrisch gelagerten Wellenanordnung (**Bild 7**), die in einer ähnlichen Ausführung ihre Zuverlässigkeit mehr als ein Jahrzehnt bewiesen hat /7/.



**Bild 7:** Prinzipielle Darstellung der Exzentereinheit zur Biegemomenterzeugung

Bei diesem Prinzip ist die Welle in drei exzentrischen Hülsen (Punkte 2, 3 und 4) gelagert. Diese Anordnung befindet sich in einem herkömmlichen Lagergehäuse (1). Bei Verdrehung der Hülsen gegeneinander lässt sich eine Exzentrizität von 0 mm bis 5 mm stufenlos einstellen. Versetzt man die Hülse 2 in eine Drehbewegung, wirkt auf den Prüfling ein umlaufendes Biegemoment.

Die Entkopplung des Schwingerjochs von der Exzentereinheit geschieht durch eine Membrankupplungseinheit. Membrankupplungen sind extrem torsionssteif, können aber Winkelverlagerungen durch ihre biegeeweiche Membran hervorragend ausgleichen /10/.

Mit dem Prüfstandskonzept wird es möglich, Prüffrequenzen bis ca. 40 Hz zu realisieren. Damit wird sich die o.a. Prüfzeit von ca. 2 Wochen auf etwa 3 Tage vermindern.

## 5 Literatur

/1/ Hove, Ulrich: Zum Verhalten biege- und torsionsbelasteter Profilwellenverbindungen. Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Berlin 1986

- /2/ Tiegom, Jean Désiré: Entwicklung eines wissenschaftlichen Systems über mechanische Werkstoff- und Bauteilprüftechnik. Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Berlin 1996
- /3/ Blumenauer, H. (Hrsg.): Werkstoffprüfung. 6.Auflage. Leipzig; Stuttgart: Dt. Verl. Für Grundstoffindustrie, 1994
- /4/ Erismann, Th.H.: Prüfmaschinen und Prüfanlagen: Hilfsmittel der zerstörenden Materialprüfung. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris u.a.: Springer 1992
- /5/ RILEM, Matériaux et constructions, Essais et recherches, vol. 16 - Nr.92: Commission Technique RILEM 30 - TE, Equipment d'essais des matériaux. Paris: Bordas-Dunod 1983
- /6/ Tiefenau, N.: Prüfstandskonzepte bei variablen Last- und Geometriebedingungen. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal 2000
- /7/ Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998
- /8/ Birkholz, H.; Heider, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 2). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998
- /9/ Cornelius, E.-A.: Die Dauerdrehwechselfestigkeit von Wellen unter dem Einfluß von Preßsitzen. Konstruktion 9 (1957), H. 8
- /10/ Birkholz, H.; Garzke, M.; Mupende, I.: TWINTORS® - Membrankupplung für Turbomaschinen. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998

## Infiltration von lasergesinterten Bauteilen

Trenke, D.

*Ein häufig verwendeter Werkstoff beim Rapid Tooling Bauprozess ist das Metallpulver Direct Metal 50-V2. Dabei handelt es sich um eine Legierung aus Kupfer, Bronze und Nickel. Ein Nachteil dieses Materials ist, dass die lasergesinterten Bauteile nur eine maximale Dichte von 70% besitzen. Zum Schließen der Poren, Steigern der Festigkeit und Verbessern der Oberflächenqualität können die Werkstücke aber mit verschiedenen Medien infiltriert werden.*

*A frequently used material by the Rapid Tooling buildingprocess is the metalpowder Direct Metal 50-V2. It is an alloy of copper, bronze and nickel. A disadvantage of this material is, that the lasersintering parts only have a maximum density of 70%. To close the pores, increase the solid and improve the surfacequality the workpieces can be infiltrated with different materials.*

### 1 Der Sinterprozess

Das vom IMW verwendete Metallpulver DirectMetal 50-V2 wurde speziell für das direkte Lasersintern entwickelt und besteht überwiegend aus einer Bronze-Nickel-Vermischung, mit einem geringen Kupfer-Phosphid (Cu-P) Anteil. Dieser dient als niedrigschmelzender Binder.

Trifft der Laserstrahl während des Bauprozesses auf die Metallpulveroberfläche wird ein Teil der Laserenergie absorbiert, wodurch sich das Pulver erwärmt. Sobald die eingebrachte Energie groß genug ist, um das Pulver auf eine Temperatur von 660°C zu erhitzen, schmilzt das Kupfer-Phosphid. Als nächstes dringt die nun flüssige Cu-P-Phase in die umgebenden Hohlräume und benetzt dabei die Bronze- und Nickelteilchen. Es kommt zu weiteren Phasenbildungen. Oberhalb von 850°C findet durch Poren- und Mischkristallbildung eine Expansion des makroskopischen Pulvervolumens, zur Kompensation des bis dahin erfolgten Sinterschwundes, statt [1]. Im Idealfall ist das Volumen des Körpers jetzt wieder identisch mit dem Volumen der losen Pulverschüttung.

Durch diesen Aufschmelzprozess und das anschließende Abkühlen entsteht die stabile metallische Matrix des gesinterten Bauteils, welche bei

optimaler Wahl der Belichtungsparameter und Belichtungsstrategie eine Dichte von 70 %, sowie folgende Materialeigenschaften (siehe **Tab. 1**) besitzt:

mechanische Eigenschaften lasergesinterner Bauteile [2]		
Dichte	6,3	g/cm <sup>3</sup>
Zugfestigkeit	120	N/mm <sup>2</sup>
Biegebruchfestigkeit	300	N/mm <sup>2</sup>
Randfaserdehnung bei Bruch	4,2	%
Rauigkeit R <sub>z</sub> ohne Nachbearbeitung	50-60	µm
Rauigkeit R <sub>z</sub> nach Polieren	1-3	µm

**Tab. 1:** mechanische Eigenschaften ohne Infiltration

Durch Infiltration mit unterschiedlichen Medien und Verfahren können die physikalischen Eigenschaften noch verbessert werden.

### 1.1 Infiltration mit Epoxid-Harz

Das beim Infiltrieren verwendete Epoxid-Harz besteht aus drei Komponenten (siehe **Tab. 2**), welche zunächst bei Raumtemperatur mit einem Magnet-rührer vermischt werden.

Funktion	Bezeichnung	Gewichts-Anteil
Harz	Rütapox	1
Härter	IPD	0,2556
Verlaufmittel	Modaflow	0,004

**Tab. 2:** Infiltrationskomponenten

Danach wird das Harzgemisch in einem Exsikkator (Vakuumglocke) bei einem Unterdruck von etwa 10 mbar für ca. 15 Minuten entgast. In der Zwischenzeit muss das zu infiltrierende Bauteil auf 100°C vorgewärmt werden. Ist dies geschehen, wird das Werkstück so lange mit der Harzmischung eingestrichen, bis die Oberfläche leicht feucht erscheint.

Anschließend wird das behandelte Bauteil in den Exsikkator gegeben und nochmals bis etwa 10 mbar evakuiert. Nach 10 Minuten wird der Behälter langsam belüftet. Dabei wird - durch den außerhalb des Bauteils steigenden Druck - das Harz in das Innere der Werkstückstruktur gepresst.

Das Auftragen und Evakuieren muss so lange wiederholt werden, bis der Körper sichtbar kein Harz mehr aufnimmt. Ist dies der Fall, wird das infiltrierte Bauteil (bzw. das Harz) in einem vorgeheizten Ofen (160°C) zwei Stunden ausgehärtet.

Zu beachten ist noch, dass das Harz durch die Temperatur im Ofen kurzzeitig niedrigviskos wird. Dadurch kann ein Teil des Harzes wieder aus dem Werkstück austreten, und sich in Ecken und Kanten ansammeln.



**Bild 1:** mit Epoxid-Harz infiltrierter Druckbehälter

Durch die geringe Aushärtetemperatur von 160°C ist die thermische Belastung des Bauteils beim Infiltrieren vernachlässigbar klein. Außerdem bleibt die im Bauprozess erreichte Maßgenauigkeit erhalten, da es zu keinen weiteren Ausdehnungen oder Schwindungen kommt.

Nach der Behandlung mit Epoxid-Harz ist eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualität und der mechanischen Eigenschaften (siehe **Tab. 3**) festzustellen.

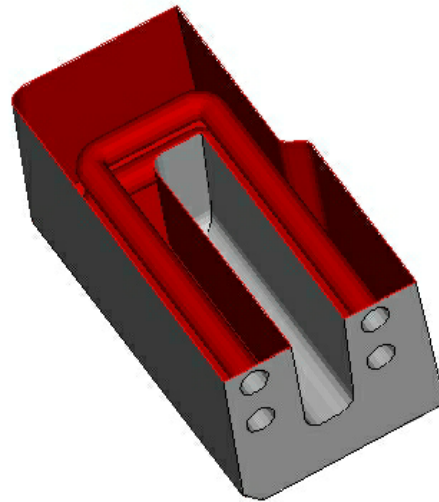
mechanische Eigenschaften nach dem Infiltrieren [2]		
Dichte	6,5	g/cm <sup>3</sup>
Zugfestigkeit	200	N/mm <sup>2</sup>
Biegebruchfestigkeit	400	N/mm <sup>2</sup>
Randfaserdehnung bei Bruch	4,2	%
Rauigkeit R <sub>z</sub> ohne Nachbearbeitung	30-40	µm
Rauigkeit R <sub>z</sub> nach Polieren	1-3	µm

**Tab. 3:** Eigenschaften nach der Epoxid-Infiltration

Durch die Infiltration sollte jetzt eine vollständig dichte Bauteilstruktur vorliegen. Erfahrungen zeigen aber, dass zum Beispiel aus Kühlkanälen (bei einem Druck von 6 bis 7 bar) immer noch Wasser durch das Werkstück austritt. Eine Infiltration des Harzes unter Druck, oder eine Nachbehandlung mit Kühlerdichtflüssigkeit, kann hier für Abhilfe sorgen.

## 1.2 Abdichten von Kühlkanälen

Ein großer Vorteil des Rapid Tooling Bauprozesses ist, dass Kühlkanäle beim Generieren der Formhälften gleich mit aufgebaut werden können. Dabei sind dreidimensionale Geometrien und Verläufe möglich, die durch kein spanendes Fertigungsverfahren oder durch funkenerosives Abtragen herzustellen sind (siehe **Bild 2**).



**Bild 2:** Schnittdarstellung von 3D-Kühlkanälen

Allerdings besitzen die lasergesinterten Metallformen nach der Infiltration mit Epoxidharz noch eine Restporosität von ca. 5 %. Um 100 % dichte Kühlkanäle zu erhalten, können diese mit Kühlerdichtflüssigkeit versiegelt werden [3].

Dazu wird das Kühlerdicht zunächst mit Wasser fünffach konzentriert vermischt und auf 100°C erwärmt. Hierbei ist auf ein permanentes Verrühren der Flüssigkeiten zu achten.

Anschließend fördert eine Pumpe die Kühlerdichtlösung aus einem Vorratsbehälter, durch die Kühlkanäle des Metallsinterparts und wieder zurück, in den Vorratsbehälter. Dabei müssen die Kühlkanäle möglichst senkrecht und mit den Ein- und Auslassöffnungen nach unten angeordnet sein, damit es nicht zu unregelmäßigen Ablagerungen kommt. Diesen Kreislauf lässt man nun für ca. eine Stunde laufen, wobei auch mehrere Formhälften in „Reihe“ geschaltet werden können.

Zum Testen der Dichtheit der Versiegelung wird eine Öffnung des Kühlkanals verschlossen und die andere mit Druckluft beaufschlagt. Taucht man nun das Bauteil unter Wasser kann man einfach überprüfen, ob die Kanäle dicht sind. Sollten noch Luftblasen austreten, schließt man den Formeinsatz für eine weitere Stunde an den Kreislauf an.

### 1.3 Infiltration mit Zinn

Für eine erfolgreiche Infiltration von lasergesinterten Bauteilen mit Zinn (Sn60PbAg) müssen die Werkstücke zunächst von Verunreinigungen und Pulverresten befreit werden. Außerdem ist es unumgänglich ein Flussmittel, zur Reduktion von Oxidschichten, zu verwenden. Das Flussmittel (ZnCL<sub>2</sub>-Lösung) wird auf die Bauteiloberfläche aufgetragen und dringt sofort durch die offenen Oberflächenporen in den Körper ein, bis dieser vollständig durchtränkt ist.

Das so vorbehandelte Sinterteil wird dann für 10 bis 20 Minuten in die ca. 220°C heiße Zinn-Schmelze gegeben. Dabei verdampft zunächst das Flussmittel, bevor das flüssige Zinn durch die Poren in das Bauteil eindringt.

Ein wesentlicher Parameter bei dieser Infiltrationsmethode ist der Kapillardruck. Dieser sinkt mit steigendem Porendurchmesser. Auf der anderen Seite ist eine große Porosität erforderlich, um über offene Porenkanäle das gesamte Volumen infiltrieren zu können. Um diesen Widerspruch zu begegnen besteht die Möglichkeit mit Druck zu infiltrieren, was aber einen größeren apparativen Aufwand zur Folge hat [3].

Untersuchungen der Firma EOS haben weiterhin gezeigt, dass Bauteile mit unterschiedlicher Ausgangsdichte nur bis zu einem konstanten Restporenvolumen (12 % ± 1,5 %) aufgefüllt werden können. Körper höherer Dichte werden dabei, aufgrund der kleineren Porenkanäle, langsamer infiltriert; erreichen aber dennoch die gleiche Enddichte, wie Körper kleinerer Ausgangsdichte.

Ein weiterer wichtiger Zusammenhang besteht zwischen der Infiltrationstemperatur und der Infiltrationszeit. Mit zunehmender Temperatur sinkt zwar die Infiltrationszeit, es kommt aber auch zu einem Bauteilschwund. Dieser beträgt bei einer Temperatur zwischen 300°C und 350°C etwa 1,5 %. In bezug auf die Bedeutung der Form- und Maßhaltigkeit sollte daher immer mit der niedrigstmöglichen Temperatur infiltriert werden.

Nach der Entnahme der Bauteile aus dem Zinnbad ist überflüssiges Infiltrationsmaterial und Flussmittel durch Abtupfen oder mit Pressluft zu entfernen.

**Bild 3** zeigt eine lasergesinterte Probe nach der Infiltration mit Lötzinn und anschließenden Sandstrahlen. Untersuchungen der Probe ergaben, dass sie vollständig mit Lötzinn durchsetzt ist und keine Maßabweichungen zum uninfiltrierten Zustand aufweist.



**Bild 3:** mit Zinn infiltrierter Probekörper

## 2 Weitere Infiltrationsuntersuchungen

Der Zahnwellenstumpf in **Bild 4** diente zur Untersuchung der Dichtheit von lasergesinterten Bauteilen gegenüber aggressiven Medien, wie sie zum Teil im Automobilbau (Brems- und Kühlflüssigkeiten) verwendet werden.

Dazu wurde die Bohrung zunächst mit Epoxidharz gefüllt und dann mit einem Druck von 6 bar beaufschlagt. Der Druck blieb so lange angelegt, bis das Harz an der Außenseite des Werkstücks austrat.

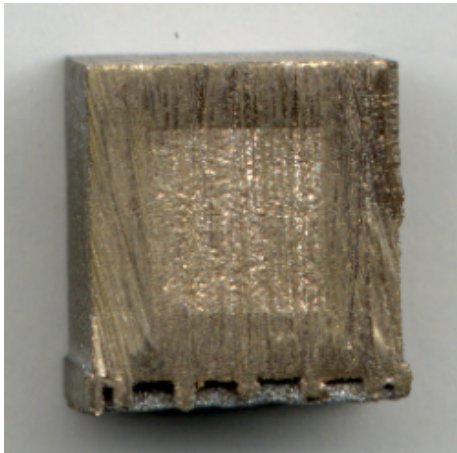
Nach dem Aushärten des Harzes konnten in diese Bohrung die verschiedenen Testflüssigkeiten eingefüllt, und das Bauteilverhalten unter Druck- und Temperatureinwirkung beobachtet werden.



**Bild 4:** mit Epoxidharz infiltrierter Zahnwellenstumpf

Die Tests ergaben, dass das verwendete Epoxidharz gegenüber den meisten Medien resistent ist und die Dichtheit auch im Dauerbetrieb unter extremen Bedingungen erhalten bleibt.

Sehr gute Ergebnisse im Bezug auf die Dichte lasergesinterter Bauteile erzielen wir auch bei der Infiltration mit Silberbronze (siehe **Bild 5**). Aufgrund der niedrigen Viskosität durchdringt die Flüssigkeit die Bauteile vollständig und härtet - ohne weitere thermische Nachbearbeitungsprozess - vollständig aus. Es tritt also kein Bauteilschwund auf. Die Temperaturbeständigkeit der Silberbronze beträgt mindestens 800°C.



**Bild 5:** mit Silberbronze infiltrierte Probe

### 3 Zusammenfassung

Wie die Ausführungen gezeigt haben, lassen sich die Eigenschaften lasergesinterter Bauteile noch durch verschiedene Infiltrationsverfahren und Medien verbessern. Die Auswahl der Methode muss dabei in Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen an das Werkstück erfolgen.

Sollen zum Beispiel nur die mechanischen Eigenschaften gesteigert werden, so ist eine „einfache“ Epoxidharzinfiltration ausreichend. Kommt es zudem auf die Dichtigkeit der Werkstücke an, ist eine Druckinfiltration oder eine zusätzliche Nachbehandlung mit Kühlerdichtflüssigkeit erforderlich.

Eine Behandlung mit Zinn erzeugt zwar glatte Werkzeugoberflächen, die Bauteilfestigkeit und das Verschleißverhalten wird aber nur geringfügig beeinflusst. Zudem nimmt der Temperatureinsatzbereich ab.

### 4 Literatur

- /1/ EOS; Basis Training  
EOS GmbH, Planegg, 1999
- /2/ EOS; Materialdatenblatt Direct Metal 50-V2  
EOS GmbH, Planegg, 1999
- /3/ EOS; Betriebsanleitung EOSINT M 250  
EOS GmbH, Planegg, 1999

## Experimentelle Beanspruchungsanalyse an einer Hubwinde

Mupende, I.; Otto, St.

*Als Ergänzung zum Beitrag „Windentrommeln auf dem Prüfstand“ in dieser Institutsmitteilung berichtet der vorliegende Artikel über die ersten Versuchsreihen, die in Zusammenarbeit mit einem bekannten Kranhersteller auf dem neuen Universal-Seiltrommelprüfstand des Instituts durchgeführt wurden. Es werden in kurzer Form die Versuchsvorbereitungen, die Meßtechnik und einige interessante Ergebnisse vorgestellt.*

*In addition to the article „Drum-Winches on the Test Rig“ in this annual report, the following article informs about the first tests which were undertaken on the new drum-winch test rig in cooperation with a well known crane manufacturer. On the following pages the test preparations, the measuring equipment and some of the interesting results will be described.*

### 1 Ausgangssituation

Seit mehreren Jahren wird die hier zu untersuchende Hubwinde erfolgreich im praktischen Betrieb eingesetzt. Die Auslegung der Windentrommel erfolgte auf der Grundlage genormter Berechnungsverfahren und eines firmeninternen Know-how's. Im Rahmen der Versuche sollten nun die realen Bean-

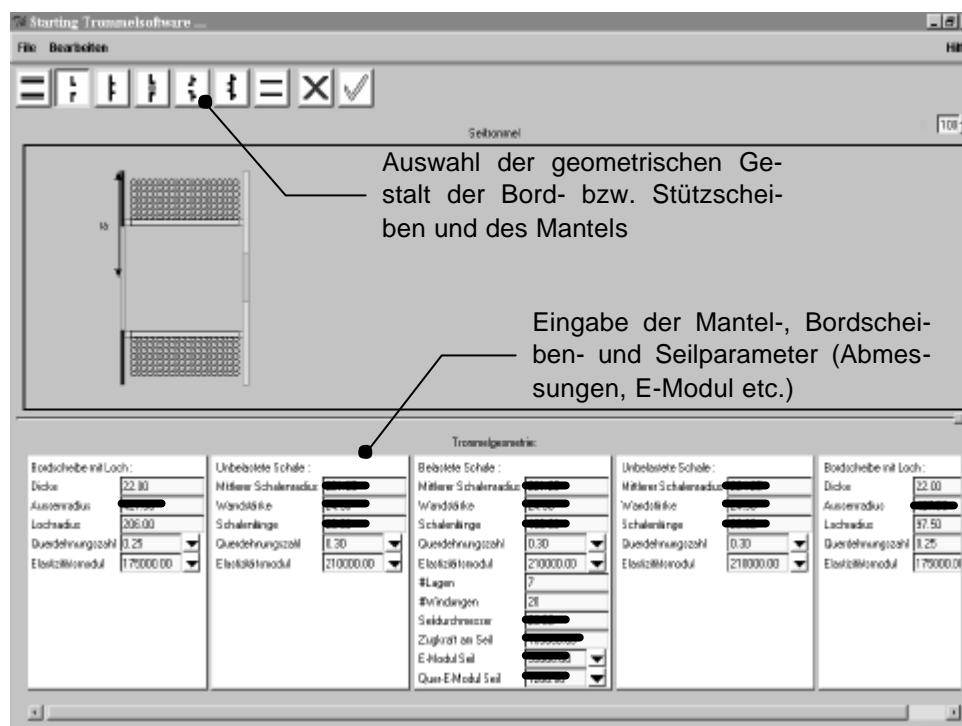
spruchungen im Trommelmantel unter verschiedenen Lastsituationen gemessen und ein eventuell vorhandenes Potential zur Gewichtsreduzierung aufgezeigt werden.

Ein weiteres Ziel der experimentellen Untersuchungen war die Verifikation der Resultate von Finite Elemente Berechnungen und von analytischen Betrachtungen, die zur qualitativen und quantitativen Beschreibung der Beanspruchungen im Trommelmantel ebenfalls am IMW durchgeführt wurden.

### 2 Finite Elemente Berechnungen

Am IMW wurde eine Methodik für den Einsatz der Finite Elemente Simulation entwickelt, mit deren Hilfe die Beanspruchungen im Trommelmantel mit sehr hoher Genauigkeit bestimmt werden können.

Eine der Randbedingungen für die Finite Elemente Berechnungen ist der als Lasteingangsgröße anzunehmende mittlere Druck auf den Trommelmantel. Dieser durch die Seilzugkraft erzeugte Manteldruck und die daraus resultierenden Beanspruchungen können mit dem am IMW entwickelten Trommeldimensionierungsprogramm TroDim (Bild 1) ermittelt werden. Dabei werden sowohl die Entlastungsf-



**Bild 1:** Eingabemaske des Trommeldimensionierungsprogramms TroDim



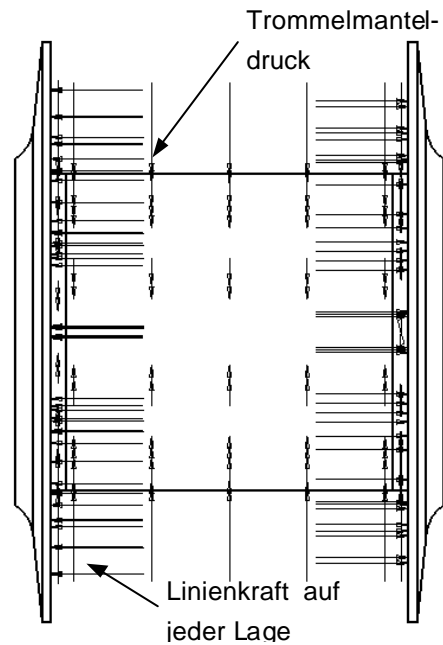
fekte durch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Windungen als auch die durch eine mehrlagige Bewicklung entstehende Entlastung des Trommelmantels berücksichtigt. Die Berechnungsalgorithmen des Programms leiten sich aus der Schalen- und Plattentheorie ab. In der aktuellen Version ist die lagenabhängige Variation des Querelastizitätsmoduls verwendeter Seile ebenfalls in die Berechnungen einbezogen.

**Bild 1** zeigt die Eingabemaske des Dimensionierungsprogramms, in der außer den geometrischen Abmessungen beispielsweise auch die Angaben zum Werkstoff des Trommelmantels und der Bordscheiben sowie die Eigenschaften des aufgelegten Seils erfaßt werden.

Das Trommeldimensionierungsprogramm berücksichtigt lediglich ideale Geometrien für den Mantel und die Bordscheiben. Unstetigkeiten, wie Verschraubungen, eine Berillung der Trommel, das Seilschloß, angeschrägte Bordscheiben oder Kerbradien, werden bei der Ermittlung der Beanspruchungen nicht beachtet. Hierfür dient die FE-Simulation, mit der die reale Bauteilgeometrie besser nachempfunden werden kann. Im Sinne einer zeit-effizienten Berechnung wurden die Festigkeitsberechnungen allerdings an einem abstrahierten Modell der Trommel durchgeführt. In **Bild 2** sind die Originalgeometrie und das vereinfachte FE-Modell der Trommel gegenübergestellt. Wesentliche Vereinfachungen sind:

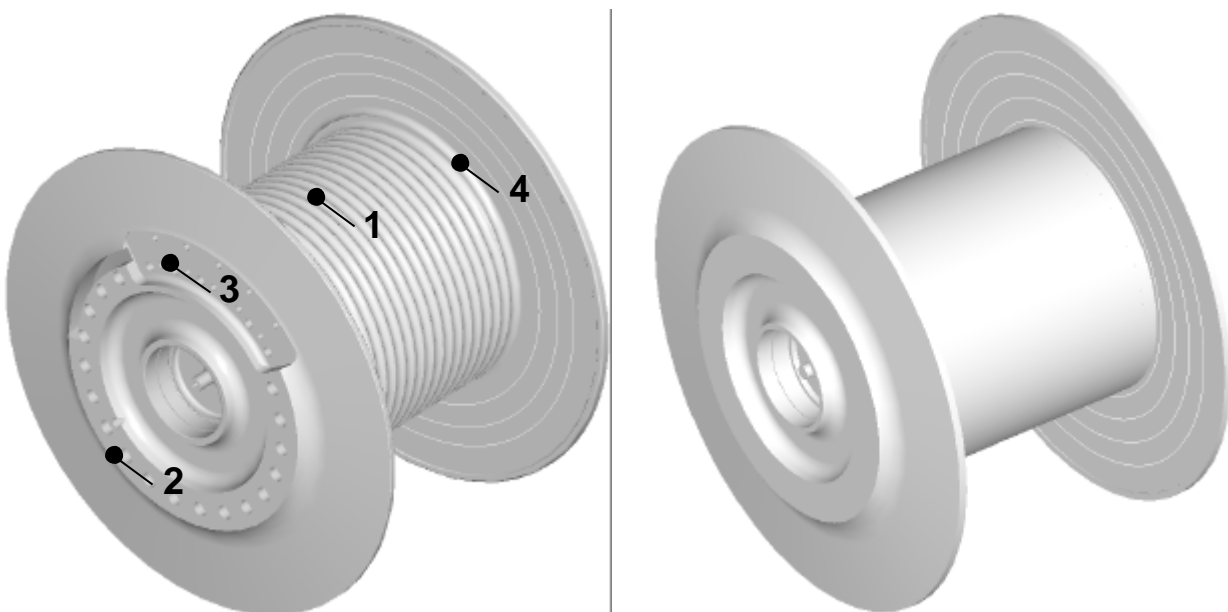
- Vernachlässigung der Berillung (1) in der Spannungsermittlung; der Außendurchmesser des Trommelmantels entspricht dem Grunddurchmesser,

- Einkörperberechnung ohne Kontakt zwischen Endscheiben und Trommelmantel; die Verschraubung (2) von Mantel und Endscheiben wurde nicht beachtet,
- Vernachlässigung des Seilschlusses (3) und
- die Berillung (Aufstiegs- und Parallelbereiche) auf beiden Endscheiben (4) blieb bei der Modellierung außen vor.



**Bild 3:** Lasteingangsgrößen für das FE-Modell

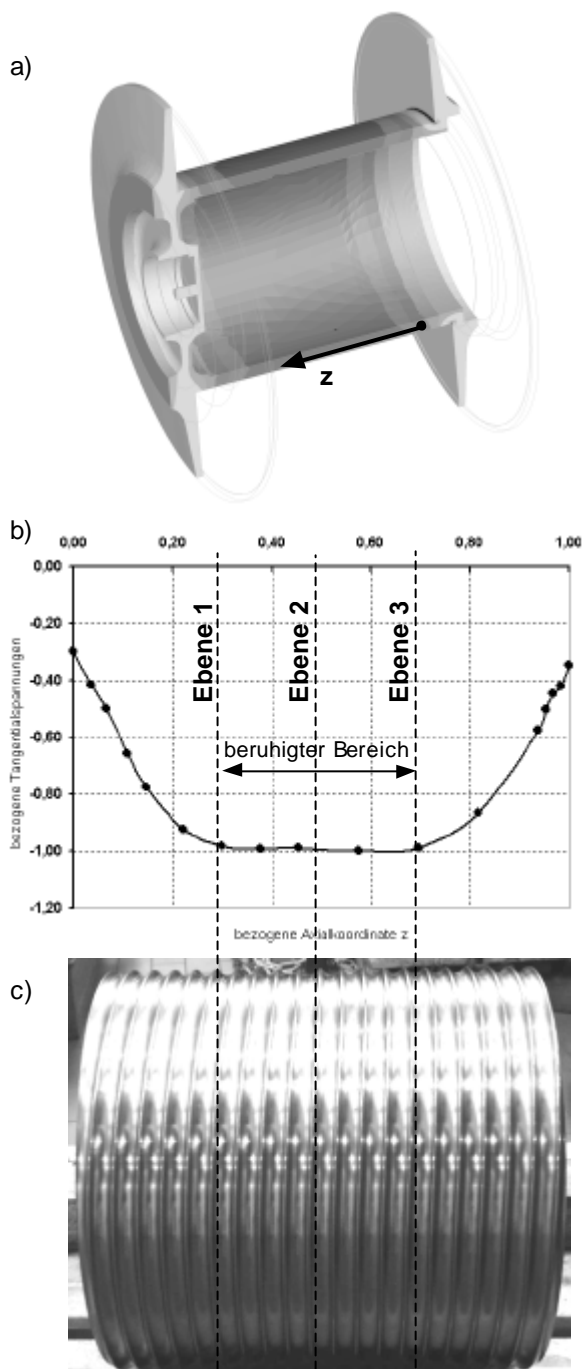
Als Fesselbedingung für das FE-Modell wurde eine Fest-Los-Lagerung angewendet, bei der die Getriebeseite in allen Freiheitsgraden fixiert ist und die Loslagerseite lediglich eine Verschiebung in Axialrichtung erlaubt. Die Lastgrößen sind in **Bild 3** dargestellt.



**Bild 2:** Originalmodell (links) und vereinfachtes FE-Modell (rechts) der Windentrommel



Das „Einschnüren“ des Trommelmantels durch den Druck der Seilwindungen führt im Wesentlichen zu tangentialen Druckspannungen. Sie entsprechen ca. 90% der nach der Gestaltänderungsenergiehypothese gebildeten Vergleichsspannung und sind somit maßgebend für die Dimensionierung des Trommelmantels. Aufgrund der rotationssymmetrischen Druckbelastung (vgl. **Bild 3**) entsteht eine rotationssymmetrische Verteilung der Tangentialspannungen im Mantel mit Maximalwerten an den Rändern des beruhigten Beanspruchungsbereichs (**Bild 4b**).

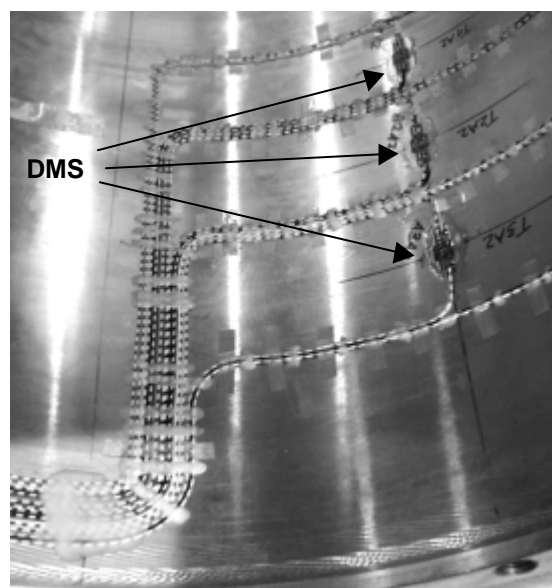


**Bild 4:** FE-Ergebnisse der Tangentialspannungen; a) Schnittdiagramm; b) Auswertung entlang eines axialen Schnitts durch den Trommelmantel; c) Meßebenen

Auf der Grundlage dieser FE-Ergebnisse wurden die Meßebenen für die experimentelle Beanspruchungsanalyse festgelegt (**Bild 4c**). Zur Vermeidung von Spannungsgradienten an der Meßstelle erfolgte die Applikation der Dehnungsmeßstreifen ausschließlich im beruhigten Beanspruchungsbereich des Trommelmantels. Die Verteilung der Meßstellen am Umfang der Trommel wurde so gewählt, daß sowohl Spannungen im Parallelbereich als auch im Aufstiegsbereich der Berillung gemessen wurden.

### 3 Experimentelle Spannungsermittlung

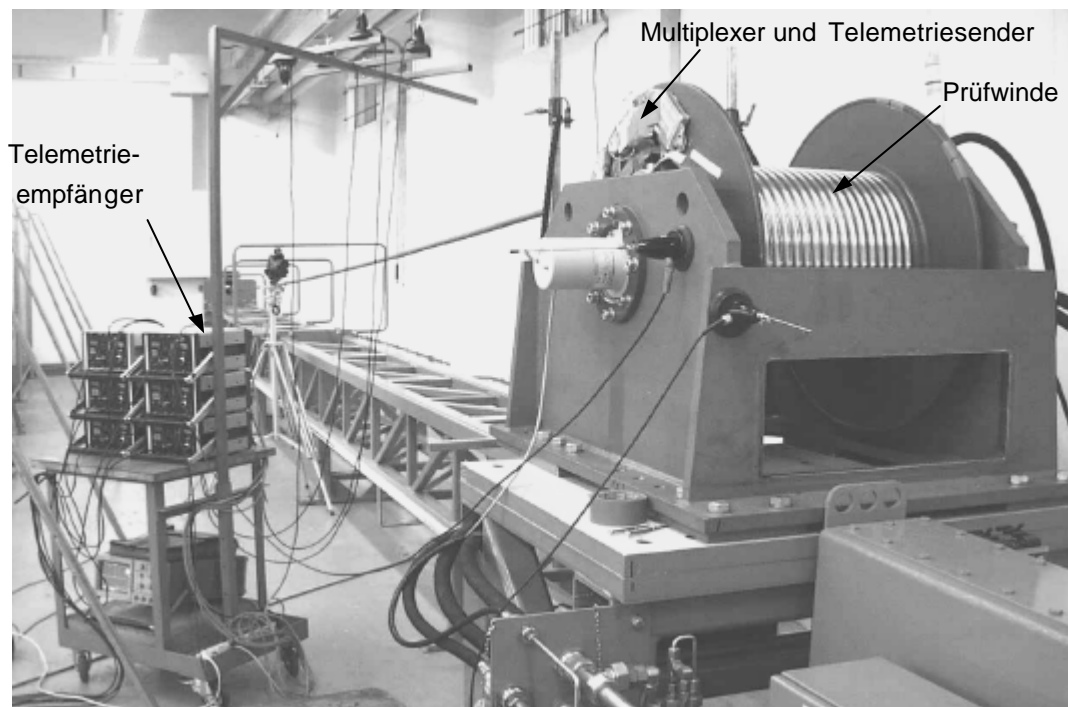
Für die Erfassung der tangentialen und radialen Spannungskomponenten am Trommelumfang wurden insgesamt 24 Dehnungsmeßstreifen appliziert. **Bild 5** vermittelt einen Eindruck von der Position und der Verkabelung der Dehnungsmeßstreifen.



**Bild 5:** Applizierte Dehnungsmeßstreifen am inneren Umfang des Trommelmantels

Um einen kontinuierlichen Versuch durchführen zu können, werden die aufgenommenen Meßsignale mit einer Mehrkanal-Telemetrieanlage zum Meßwert-Erfassungsrechner gesendet. Dabei bietet die am IMW entwickelte Vielstellenmeßtechnik die Möglichkeit, bis zu 64 Meßsignale über 4 Telemetrie Kanäle zu übertragen. Mit dieser hohen Anzahl an Meßstellen ist eine sehr gute Auflösung des Beanspruchungsverhaltens der Trommel möglich. In weiteren, hier nicht beschriebenen Versuchsreihen, konnte so auch das Beanspruchungs- und Verformungsverhalten der Bordscheiben sehr detailliert untersucht werden.

Außer den Dehnungswerten werden gleichzeitig die Seilzugkraft, die Seilgeschwindigkeit, der Lagen-



**Bild 6:** Meßaufbau (Trommel, Prüfstand, Telemetrieanlage)

wechsel und Referenzsignale zum softwareseitigen Demultiplexen der Meßsignale übertragen. Der gesamte Versuchsaufbau ist in **Bild 6** dargestellt.

#### 4 Ergebnisse

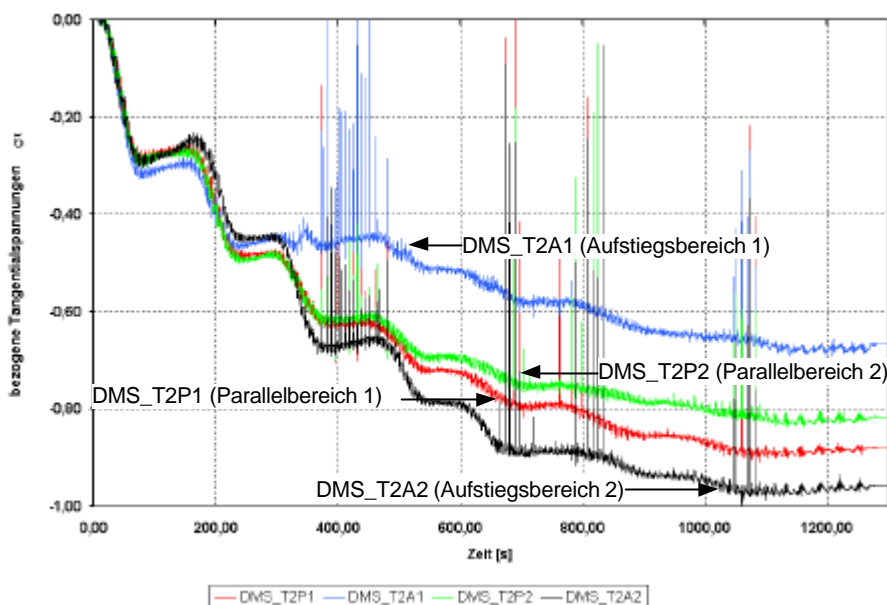
Der Verlauf der Tangentialspannungen in der mittleren Schnittebene (**Bild 7**) verdeutlicht die degressive Spannungszunahme mit wachsender Lagenanzahl. Dies korrespondiert mit einer degressiven Druckzunahme je Lage. Die gemessenen Maximalwerte der Trommelmantelbeanspruchungen,

deren Absolutwerte an dieser Stelle nicht genannt werden sollen, sind um ca. 6% niedriger als die Ergebnisse der FE-Berechnung. Im Hinblick darauf, daß die Berillung, welche im FE-Modell nicht betrachtet wurde, die Spannungen um 4 bis 6% abbaut, stimmen die experimentellen und numerischen Ergebnisse sehr gut überein.

Interessant ist der Unterschied zwischen den Spannungswerten der verschiedenen Winkellagen (vgl. **Bild 7**). Daraus läßt sich schließen, daß der Trommelmantel unsymmetrisch belastet wird, wobei die Unterschiede in den einzelnen Bereichen

bis zu 30% der Maximalbeanspruchungen betragen können. Diese Asymmetrie bildet sich erst ab der zweiten Lage heraus und ist vermutlich auf die unterschiedlichen Steifigkeiten des Seilpaketes zurückzuführen.

Zur Klärung dieses Effektes müssen detailliertere Messungen durchgeführt werden.



**Bild 7:** Auf den Maximalwert bezogene Tangentialspannungen in der Schnittebene 2 des Trommelmantels (vgl. **Bild 4**)

# Fügestellendämpfung in Feinblechkonstruktionen

Käferstein, B.

*Fügestellen leisten einen entscheidenden Beitrag zur Dämpfungserhöhung in Strukturen. Die Mechanismen beruhen dabei im Wesentlichen auf Mikrobewegungen innerhalb der Kontaktflächen. Im Zuge eines Forschungsvorhabens der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V. wird untersucht, inwieweit dieses Potential für Feinblechkonstruktionen genutzt werden kann.*

*Joints are very important to increase the overall damping performance of structures. The most important mechanism is the microslip effect around the contact region of a joining. The IMW researches on the potential of microslip damping effects in sheet metal constructions, sponsored by the Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.*

## 1 Einleitung

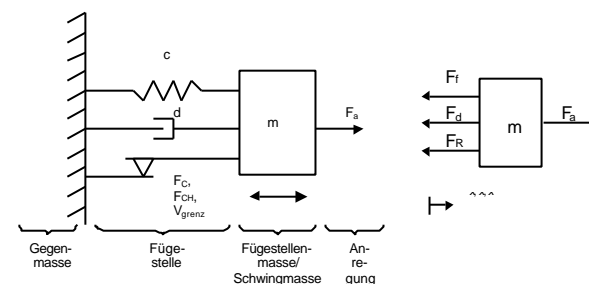
Fügestellen sind in Maschinen je nach ihrem Typ mit unterschiedlicher Häufigkeit vertreten. Ihre Anzahl kann bei kraftleitenden Konstruktionsbauteilen relativ gering sein (z. B. 3 bis 5 bei Werkzeugmaschinen) oder auch sehr groß (tausende bei KFZ, genieteten Stahlbrücken oder Luftfahrzeugen). Dabei wird neben der Festigkeit immer eine hohe Steifigkeit bei gleichzeitig großer Dämpfung gefordert. Diese setzt sich im wesentlichen aus Mikroschlupf und viskoser Reibung zusammen, die für jedes Fügeverfahren unterschiedlich gewichtet ist und mehr oder weniger stark die Struktureigendämpfung beeinflusst.

Bei dynamischer Belastung einer Fügestelle stehen meist die Festigkeitseigenschaften im Mittelpunkt. Nur in der Luft- und Raumfahrt, wo eine Schwingungsdämpfung durch Reibung mit umgebenden Medien praktisch nicht stattfindet, wird das Potenzial der Fügestellendämpfung gezielt genutzt, um die Belastungsamplituden und die Beanspruchungen zu begrenzen. Bei kleineren Amplituden, wie sie üblicherweise in der Akustik vorkommen, ist es auch vorteilhaft die Dämpfung zu erhöhen. Untersuchungen von Automobilherstellern haben gezeigt, dass durch gezielte Substitution von Punktschweißnähten durch Nietverbindungen die Karosseriedämpfung vergrößert und die Fahrzeugakustik verbessert werden kann.

## 2 Simulation

### 2.1 3-Parameter-Modell

Die Abbildung des dynamischen Verhaltens kann in der ersten Eigenfrequenz durch ein sogenanntes 3-Parameter-Modell erfolgen. Das Schwingverhalten wird durch eine Federsteifigkeit  $c$ , einem viskosen Dämpfer  $d$  und einem coulombschen Reibelement  $F_C, F_{CH}, v_{\text{grenz}}$  abgebildet. Höhere rheologische Ansätze aus mehreren Federn, Dämpfern, Losen und Wegbegrenzern bzw. Modelle mit mehreren Freiheitsgraden werden zunächst vernachlässigt. Diese Modelle führen bei zyklischer Belastung zu Hysteresen mit charakteristischen Eigenschaften und werden deshalb auch in der Werkstofftechnik zur Simulation des Materialverhaltens eingesetzt. **Bild 1** zeigt das mechanische Ersatzmodell und die freigeschnittene Masse zum Aufstellen der Bewegungsgleichungen.



**Bild 1:** 3-Parametermodell und Freischnitt

Die Summe der angreifenden Kräfte liefert die Bewegungs-DGL, wobei die Coulombsche Reibung gesondert zu betrachten ist.

$$-F_i - F_d - F_r + F_a = m \cdot \ddot{x} \quad (1)$$

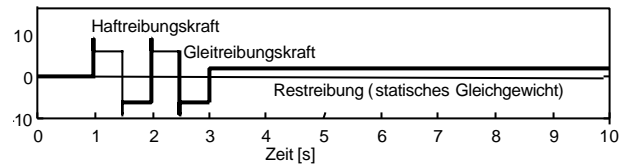
$$-c \cdot x - d \cdot \dot{x} - F_r(\dot{x}) + F_a = m \cdot \ddot{x} \quad (2)$$

Bewegt sich die Masse mit einer Mindestgeschwindigkeit von  $|\dot{x}| > v_{\text{grenz}}$ , dann wird Gleiten angenommen und die wirksame Reibungskraft  $F_r$  ist so groß wie die konstante Gleitreibungskraft  $F_r = F_C \cdot \text{sign}(\dot{x})$ . Sie ist der Momentangeschwindigkeit immer entgegengerichtet. Im Falle des Haftens, also sobald die aktuelle Geschwindigkeit  $|\dot{x}|$  einen vorgegebenen Grenzwert unterschreitet ( $|\dot{x}| \leq v_{\text{grenz}}$ ) ist die maximal wirksame Reibkraft  $F_r$  kleiner oder gleich der Haftreibungskraft  $F_{CH}$  und

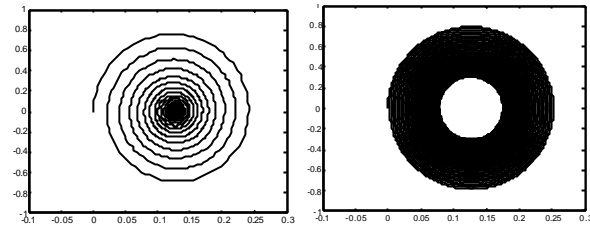
damit  $0 \leq |F_r| \leq F_{CH}$ . Ihre tatsächliche Größe berechnet sich aus dem Kräftegleichgewicht nach **Tabelle 1**. In diesem Fall ist die Haftreibung immer genau so groß, dass sie mit der Federkraft, Anregungskraft und viskosen Dämpfungskraft die Kräftesumme auf Null ausgeglichen. Das führt dazu, dass die Masse vorerst stehen bleibt. Erst wenn die Haftgrenze  $F_{CH}$  z.B. durch die äußere Anregung überschritten wird, setzt sich der Schwinger wieder in Bewegung. Das Verharren in Ruhelage tritt also immer an den Umkehrpunkten auf, dort wo die Geschwindigkeit kleiner als die Grenzggeschwindigkeit ist. Ein weiteres Mal nur noch im ausgeschwungenen Zustand. Je nach Verhältnis aus Haft- und Gleitreibungskraft ergibt sich ein unterschiedlich starker Kraftstoß, **Bild 2**.

Fall	Haften, $ \dot{x}  \leq v_{\text{grenz}}$	Kräftegleichgewicht, $ F_a - F_r - F_d  \leq F_{CH}$	Reibkraft $F_r$
1	Nein	Nein	$F_C \cdot \text{sign}(\dot{x})$
2	Nein	Ja	$F_C \cdot \text{sign}(\dot{x})$
3	Ja	Nein (Kräftegleichgewicht muss nicht mehr erfüllt werden)	$F_{CH} \cdot \text{sign}(F_a - F_d - F_r)$
4	Ja	Ja (statisches Kräftegleichgewicht muss erfüllt werden)	$F_a - F_d - F_r$

**Tabelle 1:** Reibkraft  $F_r$  in Abhängigkeit vom Bewegungszustand



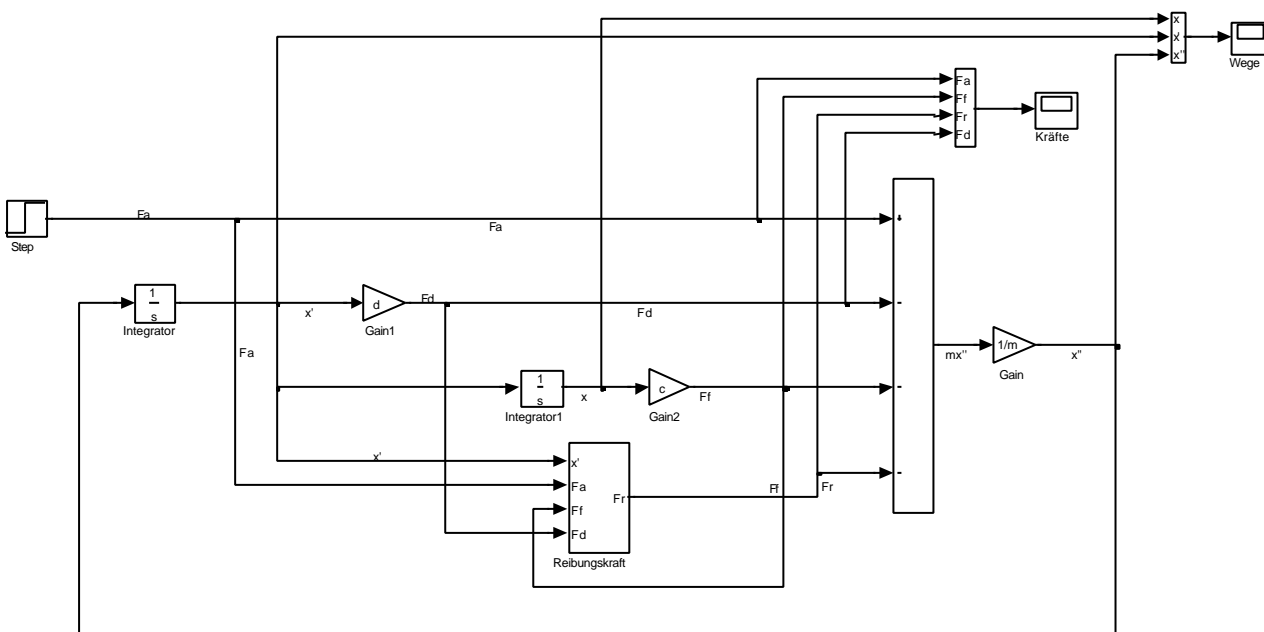
**Bild 2:** Stick-Slip-Effekte führen zu Stoßanregungen



**Bild 3:** 10 Sekunden andauernde Schwingung eines ungedämpften Einmassenschwingers in Polardarstellung (links  $\Delta t = 0.1s$ , rechts  $\Delta t = 0.01s$  als Integrationsschrittweite)

## 2.2 Numerische Lösung der DGL

Die Bewegungs-DGL, Gl. (2) kann in differentieller Form in der Simulationsumgebung dargestellt werden. Bei der Lösung ergeben sich aber numerische Schwierigkeiten, weil am Übergang von der Haftreibung zur Gleitreibung immer ein Sprung auftritt, **Bild 2**. Dieser Sprung führt beim Ableiten nach der Zeit zu unendlich hohen Werten und Unstetigkeitsstellen. Zusätzlich tritt eine rein numerisch bedingte Dämpfung auf. Sie wird nur durch das Berechnungsverfahren erzeugt und führt auch bei einem völlig ungedämpften Modell dazu, dass die Amplituden immer kleiner werden, **Bild 3**. Der Grund ist die Diskretisierung in Zeitschritte  $\Delta t$ , so dass Ma-

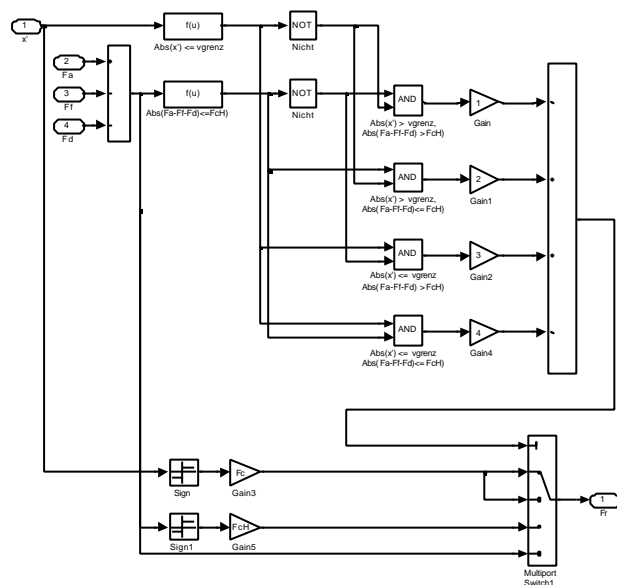


**Bild 4:** 3-Parameter-Modell in der graphischen Programmierung Simulink von The Mathworks Inc.

ximalwerte der Signale nicht vollständig erfasst werden. Um das zu vermeiden, wird die Differentialgleichung durch Verwendung von Integratoren dargestellt, Gl. (3) und **Bild 4**.

$$m \cdot \ddot{x} = F_a - d \cdot \int \ddot{x} dt - c \cdot \iint \ddot{x} dt^2 - F_c \cdot \text{sign}(\dot{x}) \quad (3)$$

Die Fallunterscheidung, in welche Richtung die Reibungskraft wirken soll und wie groß sie ist, wird in dem benutzerdefinierten Block „Reibungskraft“ vorgenommen, dessen innere Struktur in **Bild 5** dargestellt ist.

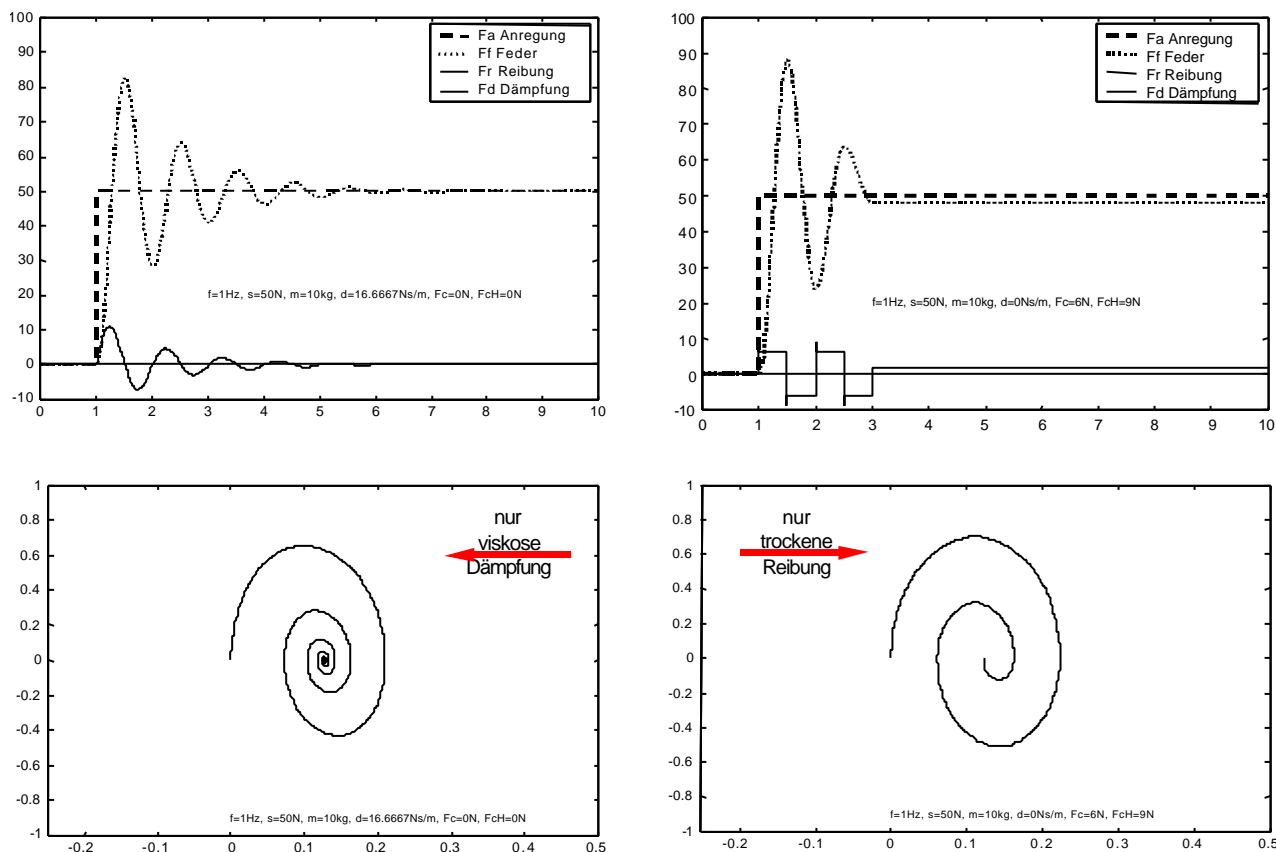


**Bild 5:** Berechnung der Reibungskraft in Simulink

## 2.3 Ergebnisse

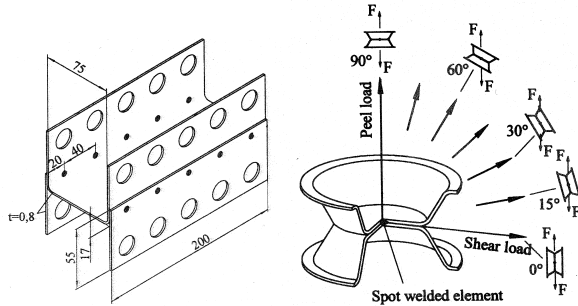
**Bild 6** zeigt graphisch die Ergebnisse aus der Simulation bei einer sprunghaften Kräfteanregung. Man erkennt beim Reibungsdämpfer, dass die Ruhelage nicht wie beim viskosen Dämpfer durch das Gleichgewicht aus Federkraft und verbleibender äußerer Kraft erreicht wird, sondern dass die Haftkraft eine bleibende Auslenkung hervorruft.

Der rechteckige Verlauf der Reibungskraft mit ihrem Haftanteil führt zu einem Sprung in der Beschleunigung. Das ist zwar im Bereich der Bauteilfestigkeit kein größeres Problem, bei der Anwendung zur Schallminderung können sich aber unangenehme Geräusche ergeben. Die Krümmung der Spirale ist ein Maß für das Abklingen der Schwingung. Für eine optimale Energiedissipation ist daher ein ausgewogenes Verhältnis aus Reibkraft und Weglänge festzulegen. In der Realität ist der Anteil der viskosen Dämpfung in der Fugestelle relativ hoch, und für kleine Amplituden nähert sich die coulombsche Reibung einem viskosen Verhalten an. Eine scharfe Trennung ist daher schwierig. Für die Umsetzung in die Praxis bieten die einzelnen Fügeverfahren unterschiedliche Möglichkeiten. Rauheit, Beschichtung, Vorspannung, Größe, Form, Kinematik oder die Werkstoffpaarung sind geeignete Parameter, die für jedes Fügeverfahren und jeden Einsatzfall zu optimieren sind.



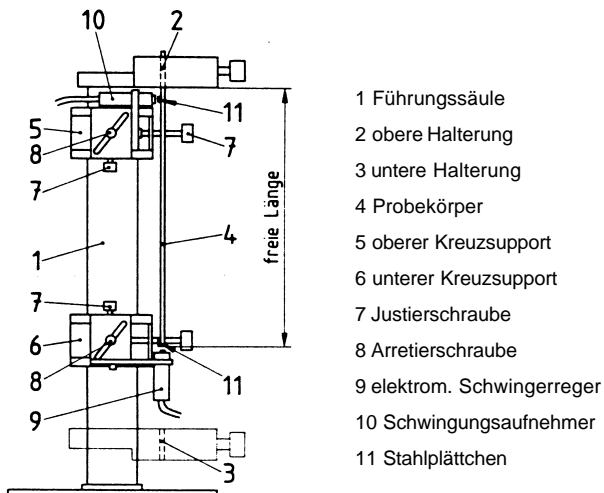
**Bild 6:** Viskos bedämpftes System (links) und reibungsbedämpftes System (rechts). Verlauf der Kräfte in N über die Zeit in s (oben) und Darstellung der Phasenplots  $\dot{x}$  über  $x$  (unten)

### 3 Prüfstandskonzept zur Messung der Dämpfung



**Bild 7:** H- und KS-Probe für Festigkeitstest

In der Werkstoff- und Fügetechnik werden für Festigkeitsuntersuchungen Scherzugproben eingesetzt, **Bild 7**, die aber für Dämpfungsmessungen nicht geeignet sind. Vielmehr ist ein Biegeschwingversuch in Anlehnung an DIN 53 440 vorzunehmen, **Bild 8**. Eine Probe, **Bild 9**, wird ein- oder beidseitig fest eingespannt und die Dämpfung im Ausschwingversuch über das logarithmische Dekrement bestimmt. Eine kontinuierliche Anregung und die Messung des Phasenwinkels kann ebenfalls herangezogen werden, um das komplexe E-Modul zu erhalten. Um das Verfahren, das nur für Werkstoffverbunde mit großem E-Modulverhältnis, wie elastomerbeschichtete Bleche, zugelassen ist, für die Dämpfungsmessung an Fugestellen unter statischer Vorlast einsetzen zu können, sind weitere Anpassungen und Untersuchungen notwendig.

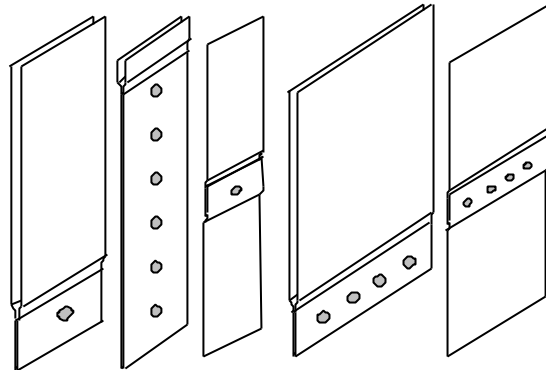


**Bild 8:** Biegeschwingprüfstand nach DIN 53 440

Es ist im Forschungsvorhaben folgende Vorgehensweise geplant :

1. Statistischer Einfluss von Einspannung, Probenfertigung, Montage etc. ermitteln  
Nachweis der Reproduzierbarkeit
2. Empfindlichkeit und Sensitivität des Aufbaus für die Dämpfungsvariationen ermitteln

3. Übertragbarkeit von einer auf zwei und auf n Fugestellen untersuchen
4. Start mit Parameteruntersuchungen von
  - a. Fügeverfahren und Fügeparameter
  - b. eingesetzten Werkstoffen
  - c. Oberflächenbehandlungen



**Bild 9:** Biegeschwingungsproben mit Fugestellen

### 4 Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass man die kürzeste Ausschwingzeit bei viskoser Dämpfung *und* Reibung erhält. Der Effekt der trockenen Reibung ist nutzbar und effektiv. Die Sprünge, die sich im Verlauf der Reibungskraft und der Beschleunigung ergeben, weil die Haftreibung größer als die Gleitreibung ist, spielt bei Reibungsdämpfern mit großen Amplituden eine entscheidende Rolle. Bei der Fugestellendämpfung können sie aber vernachlässigt werden, so dass sich ein vereinfachtes viskoses Ersatzmodell erstellen lässt. Zu beachten gilt, dass das Übertragungsverhalten nichtlinear ist und daher geringfügige Oberwellen in den Schwingungen auftreten können. Die Auslegung kann nur auf einen Betriebspunkt erfolgen und Korrosion oder Verschleiß beeinflussen sehr stark das Dämpfungsverhalten.

Eine einfache Realisierung in der Praxis ist sichergestellt, da Fugestellen ohnehin notwendig sind. Starke Einschränkungen sind jedoch Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen.

### 5 Literatur

- /1/ [www.mathworks.com/support](http://www.mathworks.com/support), Anwenderseite der The Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, USA; Oktober 2000
- /2/ Käferstein, B.: Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. P441 „Körperschall“ der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.; Institut für Maschinenwesen, Clausthal-Zellerfeld, 2000

# Schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten

Gummersbach, F.

*Die Geräuschminderung von Produkten wird aufgrund von Forderungen des Gesetzgebers und des Kunden immer bedeutender. Zur Berücksichtigung maschinenakustischer Aspekte benötigen Konstrukteure strukturiertes Methoden- und Faktenwissen.*

*Hierfür wurde ein Informationssystem entwickelt, daß dem Konstrukteur auf Basis einer schalltechnischen Analyse maschinenakustisches Problemlösungswissen unter Berücksichtigung konstruktiver Gesichtspunkte gezielt zur Verfügung stellt. Grundlage bilden dafür Lärmreduzierungskataloge, deren Aufbau sich an der EN ISO 11688-1 orientiert und eine methodische Vorgehensweise unterstützt.*

*Legal and market concerns are placing more stringent requirements on noise levels. Therefore designers need information, structured in a way to which they can relate, both for methodical approaches and specific measures (e.g. machine-acoustics, designing for production, and more).*

*Such an information system has been developed to support the designer during analysis and to provide suitable noise reduction measures. The basis for this information system are noise reduction catalogues, like design catalogues. The structure of these catalogues is oriented to the EN ISO 11688-1, thus allowing a systematic approach.*

## 1 Einleitung

Viele Schriftsteller wie Goethe, Schiller ließen sich gegen den Lärm aus. Unter einem fast philosophischen Blickwinkel beschreibt Schopenhauer den Lärm:

*"... Der Lärm aber ist die impertinenteste aller Unterbrechungen, da er sogar unsere eigenen Gedanken unterbricht, ja zerbricht. Wo jedoch nichts zu unterbrechen ist, da wird er freilich nicht sonderlich empfunden werden. ..."*

## 2 Problematik

Die Geräuschminderung von Produkten erfährt aufgrund von Forderungen des Gesetzgebers und des Kunden immer mehr an Bedeutung. Konstrukteure

haben meist nur einen geringen maschinenakustischen Kenntnisstand. Dies führt zu maschinenakustisch nicht akzeptablen Lösungen, welche erst beim Betrieb des ersten Prototypen erkannt wird. Hieraus resultieren kostenintensive Nachbesserungen, die durch eine frühzeitige Beachtung der Problematik vermeidbar gewesen wären.

Es stellt sich die Frage, wie der Konstrukteur, der auch das Geräuschverhalten gestaltet, gezielt in maschinenakustischer Hinsicht unterstützt werden kann.

## 3 Vorgehensweise bei der Konstruktion lärmarmer Produkte

Weitere Klarheit verschafft die nähere Betrachtung der Vorgehensweise zur Konstruktion lärmarmer Produkte. Zur Unterstützung einer schalltechnischen Untersuchung, erfolgt im ersten Schritt die Analyse der Problematik. Die Analyse kann dabei mit Hilfe der Schallflußmodellierung, nach /1/ und /2/ unterstützt werden, wobei der Schallfluß von der Quelle über die Übertragung bis hin zur Abstrahlung näher verdeutlicht wird.

Zu diesem Zweck platziert der Konstrukteur die Komponenten seines Konstruktionsobjekts und erstellt deren Verbindungsstruktur. Ausgehend von dieser abstrahierten Darstellung erfolgt anschließend die eigentliche schalltechnische Analyse (siehe hierzu auch /3/). In diesem Schritt werden die Objekte hinsichtlich ihrer Quellen-, Übertragungs- und Abstrahleigenschaften bestimmt, wobei eine weitere Detaillierung einzelner Komponenten notwendig werden kann. Das dabei ableitbare Analyseergebnis beinhaltet die Schlüsselinformationen zur Erarbeitung und Einschränkung von Lärmreduzierungsmaßnahmen.

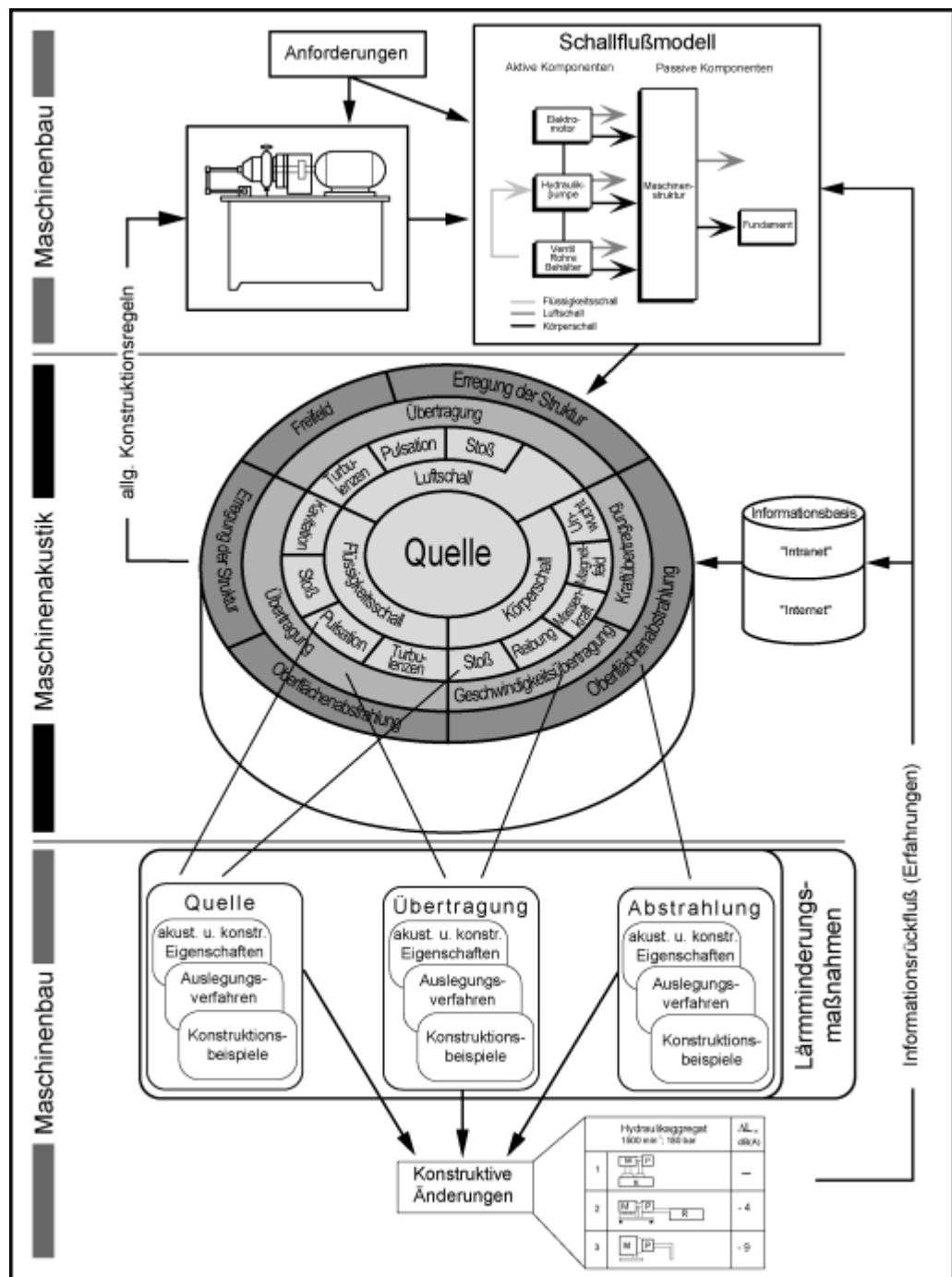
Nach einer Bewertung aller Quellen-, Übertragungs- und Abstrahlmöglichkeiten hinsichtlich ihrer schalltechnischen Relevanz, können aus einer maschinenakustischen Wissensbasis Informationen zur Lärmreduzierung erarbeitet werden.

Um einen Zugriff auf die in der maschinenakustischen Wissensbasis enthaltenen Informationen realisieren zu können, ist eine systematische Gliederung des schalltechnischen Wissens notwendig.



Aus dieser Wissensbasis ergeben sich, ausgehend von den Analyseergebnissen, Lärminderungsmaßnahmen getrennt für Schallquellen, Übertragungs- und Abstrahlungsmöglichkeiten, die dann unter technisch wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet werden können. Für eine weitere Optimierung des Konstruktionsobjektes können die Lärminderungsmaßnahmen in das Schallflußmodell integriert werden, so daß auf Basis dieser neuen Gegebenheiten eine neue schalltechnische Analyse und Abschätzung erfolgen kann.

Bei der Vorgehensweise geht der Konstrukteur ausgehend von der maschinenbaulichen Welt in die der Maschinenakustik, um dann mit geeigneten Lärminderungsmaßnahmen wieder in die maschinenbauliche Umgebung zurück zukehren, **Bild 1**.



**Bild 1:** Vorgehensweise zur Lärminderung von Produkten /3/

#### 4 Struktur der Informationsbasis

Für die Informationsverarbeitung muß die maschinenakustische Wissensbasis drei Gesichtspunkten genügen. Der Nutzer der Wissensbasis (hierbei der Konstrukteur) legt die Sichtweise und damit den Fokus der Informationsverarbeitung fest. Das Faktenwissen (maschinenakustische Wissen) muß somit unter konstruktiven Gesichtspunkten erfasst, strukturiert und abgelegt werden. Dieses Faktenwissen kann erst im Zusammenspiel mit Methodenwissen innerhalb eines bestimmten Problemlö-

sungsprozesses angewandt werden. Beide Wissensarten müssen für den Konstrukteur anwendbar und damit verständlich sein. D.h. die Struktur der maschinenakustischen Wissensbasis muß diesen drei übergeordneten Anforderungen genügen, um das für die Problemlösung notwendige Erfahrungswissen bereitstellen zu können, **Bild 2**.

Hier stellt sich die Frage nach einer geeigneten Möglichkeit der Strukturierung des Wissens. Zum einen sind die Beeinflussungsmöglichkeiten für den Konstrukteur ein wesentliches Merkmal. Zum anderen ist die Art des benötigten Wissens vom Stadium des Konstruktionsprozesses (-fortschritts) mit den

jeweiligen Teilschritten des Problemlösungsprozesses abhängig.

## 5 Entwicklung eines Katalogsystems

Aus maschinenakustischer Sicht, hat der Konstrukteur, nach der Festlegung der Wirkprinzipien, bei der Feingestaltung des Produkts die stärkste Möglichkeit der Einflußnahme auf das akustische Verhalten. In dieser Phase kann der Konstrukteur auf Basis einer Schallflußanalyse durch Lärm-minderungsmaßnahmen gezielt unterstützt werden.

Hierzu wurde eine systematische Zusammenstellung von Hilfsmitteln zur Analyse und Lösungsfindung erstellt. Kernpunkt sind dabei systematisch aufgebaute Lärm-minderungskataloge in denen eine strukturierte Ablage von gleichartig aufgebauten Wissen, für die Analyse und Lösungsfindung, möglich ist. Der prinzipielle Aufbau dieser Kataloge entspricht denen der Konstruktionskataloge nach Roth. Diese bestehen aus den folgenden vier Teilen:

**Gliederungsteil:** zur eindeutigen Zuordnung der im Hauptteil enthaltenen Informationen

**Hauptteil:** zur Ablage der eigentlichen Informationen (Quelle-, Übertragungs- und Abstrahleigenschaften und assoziierte Lärm-minderungsmaß-

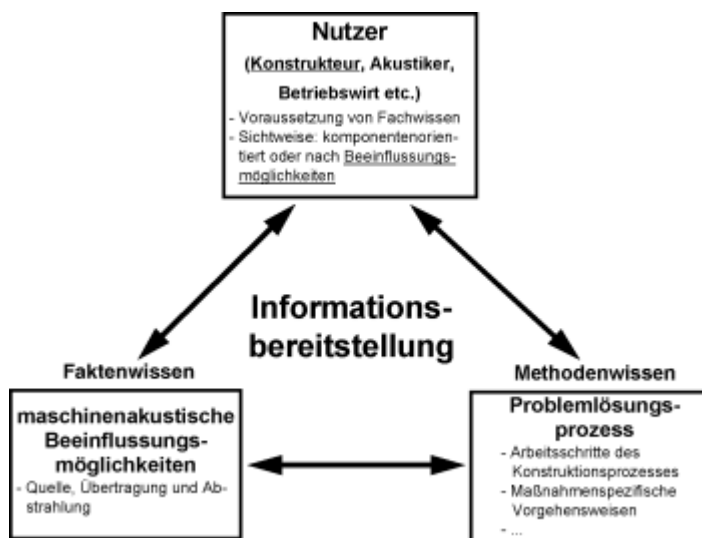


Bild 2: Interdependenzen bei der Informationsbereitstellung /4/

nahmen)

**Zugriffsteil:** zur weiteren Angabe von Randbedingungen und akustischen und konstruktiven Eigenschaften)

**Anhang:** für Hinweise auf weiterführende Literatur, Konstruktionsbeispiele, Herstellerangaben usw.

Für eine methodische Vorgehensweise, wurden Kataloge zur Unterstützung der Analyse und zur Lösungsfindung entwickelt.

So können ausgehend von einer schalltechnischen Analyse der Schallentstehung, -übertragung und -abstrahlung auf geeignete Lärm-minderungsmaß-

nahmen, im Rahmen der Lösungsfindung, verwiesen werden.

Die Kataloge erlauben eine strukturierte Ablage der Lärm-minderungsmaßnahmen mit einer gleichzeitigen Zuordnung akustischer und konstruktiver Eigenschaften, Randbedingungen und weiterführenden Hinweisen, Bild 3.

Durch den prinzipiell gleichen Aufbau der Ka-

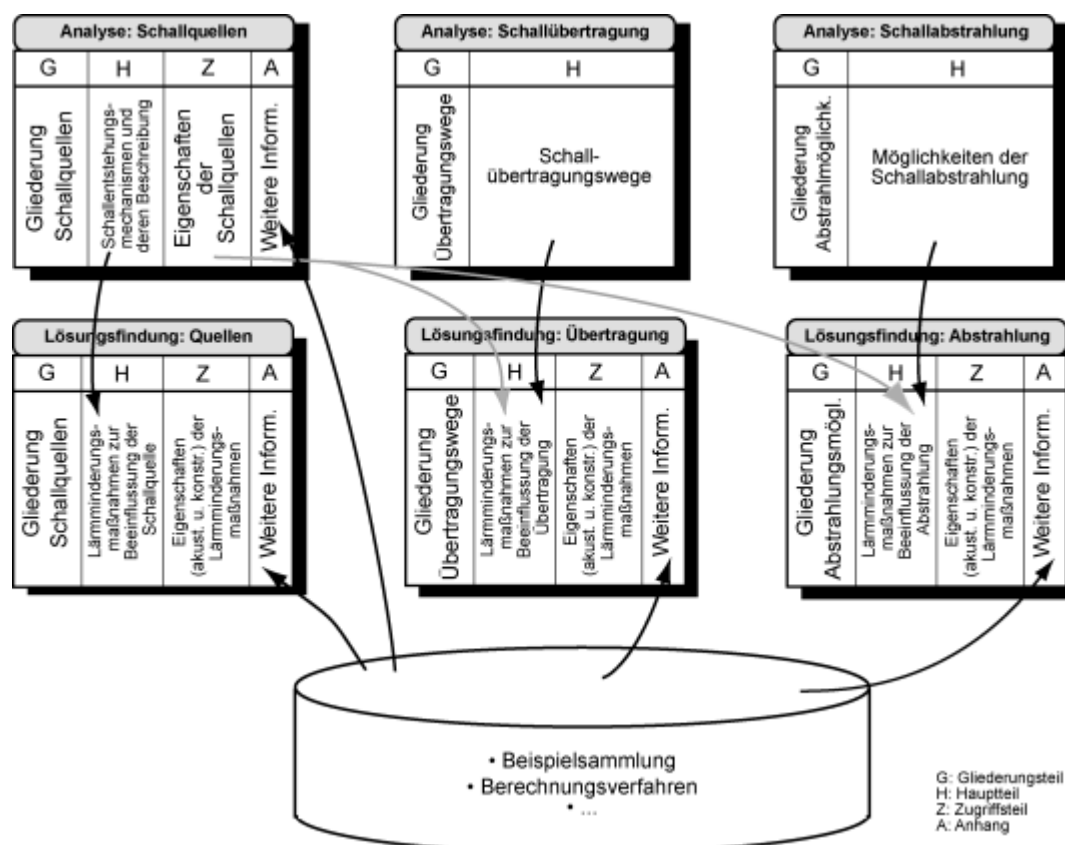


Bild 3: Interdependenzen bei der Informationsbereitstellung /4/

talogue, wird die Algorithmisierung der Vorgehensweise unterstützt. Dieser Aufbau ermöglicht die Umsetzung in ein EDV-gestütztes System, so daß eine methodische Vorgehensweise zur Entwicklung lärmgeminderter Produkte unterstützt werden kann.

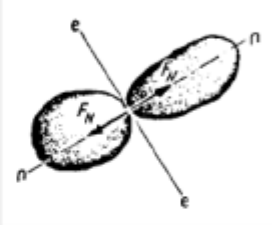
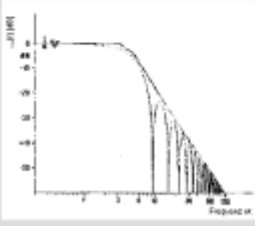
### 5.1 Schallquellenanalyse

Der Katalog für die schalltechnische Analyse der Schallquellen in **Bild 4** wird entsprechend der in EN ISO 11688-1 enthaltenen Struktur der Schallquellen gegliedert. Im Hauptteil befindet sich die Beschreibung des Schallentstehungsmechanismus sowie einige Beispiele, bei denen dieser physikalische Effekt auftritt. Der Zugriffsteil beinhaltet vor-

wiegend maschinenakustische und nur wenige konstruktive Angaben, die die Eigenschaften des beschriebenen Schallentstehungsmechanismus charakterisieren. Insbesondere sind hier die akustischen Eigenschaften zu nennen, die die Art des Geräusches näher beschreiben. Neben der graphischen Darstellung bietet sich eine Bestimmung des Geräusches durch die Beschreibung bestimmter Eigenschaften an, die eine weitere rechnerische Verarbeitung erlauben. So kann ein Geräusch durch die Art des Auftretens charakterisiert werden. Als Attribute hierfür bieten sich "impulsförmig", "breitbandig", oder "tonal/harmonisch" an. Des Weiteren kann eine tiefergehende Detaillierung über die Zuordnung zusätzlicher Attribute wie der

Beschreibung des auftretenden Frequenzspektrums (nieder-, mittel- oder hochfrequent) erfolgen. Diese Informationen sind, gerade für eine weitere Auswahl bzw. Bewertung primärer und sekundärer Lärminderungsmaßnahmen, notwendig. Die Angabe der diesen Effekt stark beeinflussenden Parameter gibt dem Konstrukteur erste Ansätze zur Umsetzung in konstruktive Einflussnahmen.

Der Anhang gibt Hinweise zu weiterführenden Informationen wie Berechnungsmöglichkeiten, Normen, Richtlinien und Literaturstellen, die dem Konstrukteur bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden können. Durch diese zusätzlichen Informa-

Schallquellenbeschreibung	
<b>Gliederung</b>	
Problemgebiet	Maschinenakustik
Beeinflussungsart	Quellen
Medium	Körperschall
Allg. Schallentstehungsmechanismus	Stoß
Spez. Schallentstehungsmechanismus	Stoß
<b>Schallentstehungsmechanismus</b>	
Entstehungsursache	Aufeinandertreffen zweier Festkörper Spiel bei wechselnden Lasten
Beispiel	Hämmern; Anschläge
	
<b>Maschinenakustische und konstruktive Angaben</b>	
spezielle Geräuscheigenschaften schlagartige Geräuschanregung	tonal tonal und harmonische breitbandig impulsförmig ++
Anregungsspektrum 	niederfrequent (<250Hz) ++ mittleres Frequenzband ++ hochfrequent (>2000Hz) +
Einflussmöglichkeiten Masse; Geschwindigkeit; Stoßzeit; (beeinflusst sehr stark die auftretenden mechanischen Belastungen)	
<b>weiterführende Informationen</b>	
Berechnungsmöglichkeiten /Föll 74/	Normen bzw. Richtlinien /ISO 11688/; /VDI-R 3720/
Literatur /Röd 66/; /Föll 74/; /FaKr 84/	

**Bild 4:** Datenblatt zur Beschreibung der Schallentstehungsmechanismen /4/

tionen erhält der Konstrukteur die Möglichkeit sich bei Bedarf weiter in das Themengebiet zu vertiefen oder eine Abschätzung der Geräuschanregung durchzuführen, **Bild 4**.

## 5.2 Lärminderungsmaßnahmen -Schallquellen-

Der Katalog zur Lösungsfindung von primären Lärminderungsmaßnahmen beinhaltet konstruktive Möglichkeiten zur Reduzierung der bei der speziellen Schallanregung auftretenden Wechselkräfte.

Der Gliederungsteil des Katalogs ist mit dem zur Schallquellenanalyse identisch, so daß die Referenzierung von den ermittelten Schallquellen zu den primären Lärminderungsmaßnahmen einfach zu erstellen ist. Im Hauptteil befinden sich eine oder mehrere konstruktive Lärminderungsmaßnahmen mit ihren Erläuterungen der Wirkungsweise, die im Zugriffsteil näher charakterisiert werden.

Der Zugriffsteil beinhaltet, neben allgemeinen maschinenakustischen, auch verstärkt konstruktive Angaben, die gerade bei der Bewertung und Umsetzung benötigt werden. Die maschinenakustischen Angaben beschränken sich hierbei auf den prinzipiellen Verlauf der Pegelminderung in Abhängigkeit der Frequenz sowie der in etwa erreichbaren Gesamtpegelminderung durch die Maßnahme. Eine nähere Beschreibung der maschinenakustischen Anwendbarkeit ist nicht notwendig, da diese schon durch die Zuordnung der Maßnahme zu den speziellen Schallentstehungsmechanismen erfolgt ist. Gerade die Angaben zu konstruktiven Gesichtspunkten, die mit der ausgewählten Maßnahme verbunden sind, beziehen sich auf Vor- und Nachteile dieser Lösung. So sind u. U. weitere konstruktive Berücksichtigungen bei der Wahl dieser Maßnahmen zu treffen bzw. zu beachten. Ferner können zugehörige Gestaltungsregeln und -hinweise mit angegeben werden, die die Wirkung und Einflußgrößen dieser Maßnahme beschreiben.

Die im Anhang befindlichen Informationen unterstützen den Konstrukteur bei der Erläuterung und Auslegung der Maßnahme durch Literaturhinweise, Normen, Richtlinien, Auslegungsvorschriften und Konstruktionsbeispiele. Soweit vorhanden, werden zudem Angaben zu möglichen Herstellern von bestimmten Produkten mit angegeben, die hierfür fertige Lösungen bzw. Halbzeuge anbieten, **Bild 4** (Hintergrund). Diese könnten gegebenenfalls mit einem Link zu deren Internet-Adresse versehen werden.

## 5.3 Lärminderungsmaßnahmen und Konstruktionsbeispiele -Schallübertragung-

Die Lärminderungsmaßnahmen zur Beeinflussung der Schallübertragung gliedern sich entsprechend die der EN ISO 11688-1, jedoch zusätzlich in Dämmung und Dämpfung. Die zusätzliche Untergliederung ergibt sich aus den prinzipiellen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Schallübertragung.

Im Hauptteil wird die konstruktive Maßnahme mit dem prinzipiellen Aufbau näher spezifiziert, das Wirkprinzip erläutert und anhand einer Abbildung weiter verdeutlicht.

Der Zugriffsteil enthält, wie die vorherigen Kataloge, maschinenakustische und konstruktive Angaben. Im Gegensatz zum Katalog für die Lärminderungsmaßnahmen der Schallquellen erfolgen hier zusätzlich Angaben zur maschinenakustischen Eignung der Maßnahme. Es sind die gleichen Angaben, die bei der Schallquellenbeschreibung aufgeführt werden und die somit die Eignung der Maßnahme, in Abhängigkeit von Geräuschart und Frequenzbereich, näher spezifizieren. Diese Angaben sind insbesondere bei der Auswahl der Maßnahmen unter schalltechnischen Gesichtspunkten notwendig, da diese mit denen der Anregungsspektren der Schallquellen verglichen werden können. Hierdurch kann schon eine erste Einschränkung des Lösungsfeldes auf Basis schalltechnischer Angaben automatisiert werden. Eine weitere Einschränkung des Lösungsfeldes erfolgt durch die konstruktiven Angaben, **Bild 5** (Hintergrund).

Die weiterführenden Informationen des Anhangs entsprechen denen des zuvor erläuterten Katalogs. In **Bild 5** (Vordergrund) ist dazu beispielhaft ein Konstruktionsbeispiel zu der dargestellten Maßnahme abgebildet. Durch eine Referenzierung zwischen dem Konstruktionskatalog und einer Beispielsammlung läßt sich der Zugriff realisieren.

## 5.4 Lärminderungsmaßnahmen - Abstrahlung-

Der Aufbau des Lärminderungskatalogs für die Schallabstrahlung entspricht bis auf den Gliederungsteil dem des Katalogs der Schallübertragung. Lediglich die Untergliederung der Maßnahmen wurde auf diese Beeinflussungsart angepasst.

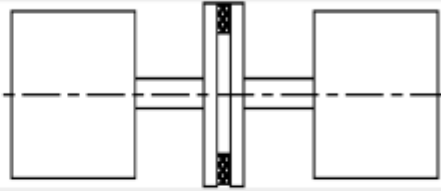
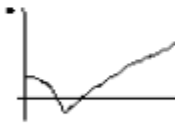
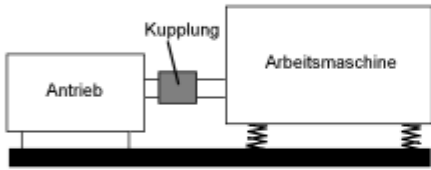

## 6 Informationssystem

Die derzeitig implementierte Funktionalität des Informationssystems greift auf einen vereinfachten

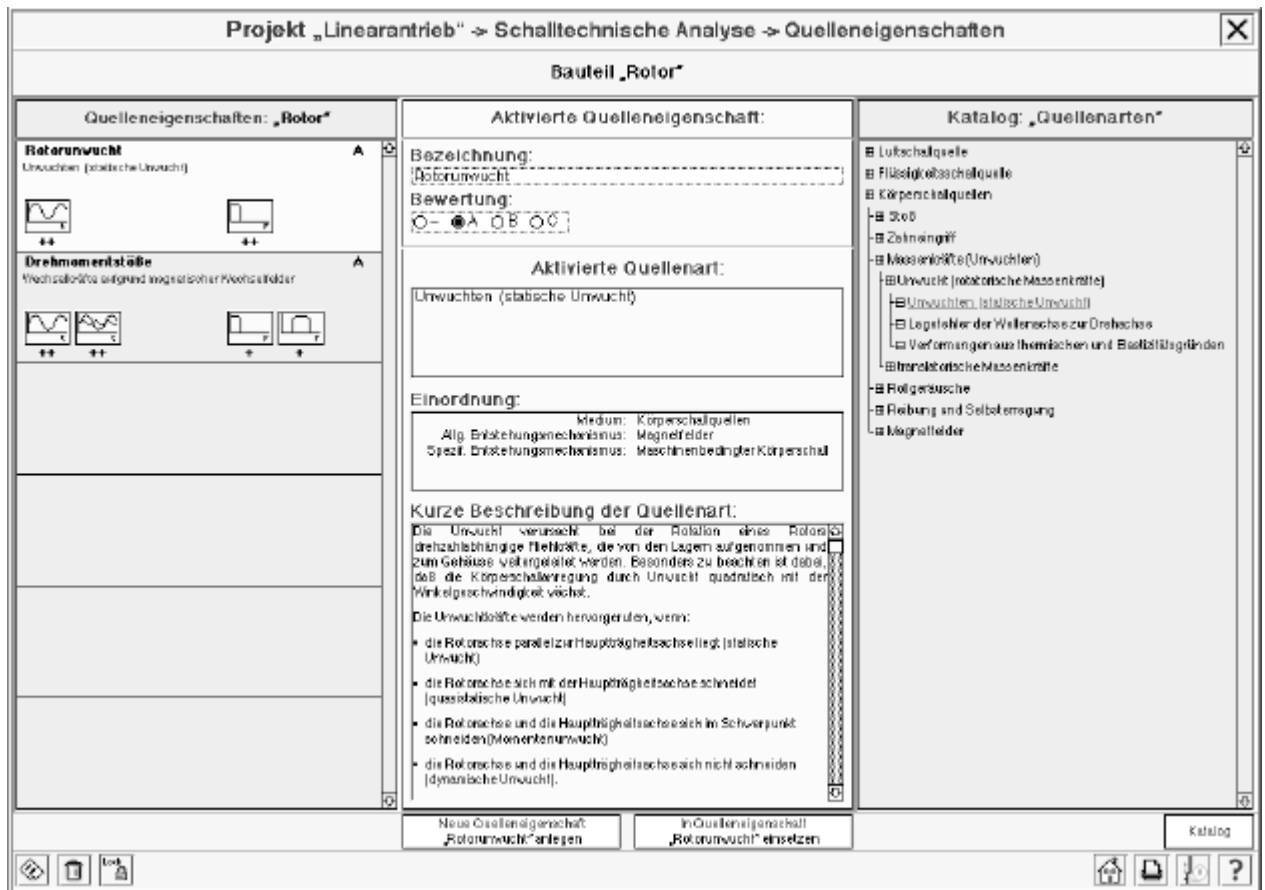
Schallflußmodellierer sowie Datenbanken mit Quelleneigenschaften, Lärminderungsmaßnahmen und maschinenakustischen Konstruktionsbeispielen zu. Die über den Modeller erfaßte Modellstruktur beinhaltet die relevanten Bauteile, denen dann maschinenakustische Eigenschaften zugeordnet werden. Nach einer Grob-bewertung der jeweiligen maschinenakustischen Eigenschaften, also der Einschätzung des einzelnen Beitrags zu dem insgesamt abgestrahlten Schall, können Lärmmin-derungsmaßnahmen durch das Informationssys-tem für die jeweiligen Bauteile er-arbeitet werden. Die auf Basis vor-heriger Angaben ermittelten Lärm-minderungsmaß-nahmen stehen nun für eine wei-tere Bewertung unter konstrukti-ven und wirt-schaftlichen Ge-sichtspunkten zur Verfügung.

Die Ermittlung der Maßnahmen er-folgt über einen Vergleich der "be-rechneten" bzw. "vorgegebenen" Schallcharakteris-tiken (Art und Frequenzbereich), wie sie z.B. in **Bild 5** dargelegt

sind. Dies bedeutet zwar starke Vereinfachungen der schalltechnischen Eigenschaften, ermöglicht jedoch dem Konstrukteur erste Abschätzungen und die Erarbeitung von Lärminderungsmaßnahmen.

Lärminderungsmaßnahme: Übertragung	
<b>Gliederung</b>	
Problemgebiet	Maschinenakustik
Beeinflussungsart	Übertragung
Medium	Körperschall
Maßnahme	Dämmung (Reflexion durch Impedanzänderung)
konstruktive Maßnahme	Schwingungsisolierung
<b>Maßnahme</b>	
Benennung der Maßnahme	Drehelastische Kupplung
Wirkprinzip	Erhöhung der Eingangs- oder Übertragungsimpedanz mittels Reflexion an Diskontinuitätsstellen durch Änderung der Steifigkeit
prinzipieller Aufbau	Masse-Federsystem
	
<b>Maschine</b>	
Anwendung	Schwingungsisolierung Drehschwingungen
prinzipielle Pegelminderung	
erreichbare Pegelminderung	Körperschallpegeldifferenz jedoch stark von den Randbedingungen abhängig (Freq. und Maßnahme)
konstruktive Berücksichtigung	Berücksichtigung der sich ändernden Eigenfrequenz
Konstruktionsbeispiele	Drehelastische Klauen- Elastomerzahnkranz
Hersteller	Firma A; Firma B
<b>Konstruktionsbeispiel</b>	
Beeinflussung der	Körperschallübertragung
Konstruktionsregel für	Schwingungsisolierung
Schallart	Körperschall
Konstruktionsregel	Schwingungsisolierung der Quelle (im mittleren Frequenzbereich)
Abbildung der Komponente	
	
Kurzbeschreibung der Maßnahme	
Schwingungsisolierung der Drehschwingung	
Beschreibung des Beispiels	
Drehschwingungsisolierung	
Beschreibung der Schallquelle	
Ein Elektromotor treibt über eine Welle eine Arbeitsmaschine an, die aufgrund ihres Arbeitsverfahrens starke Drehschwingungen im Antriebsstrang erzeugt.	
Angewandte Schallminderungsmaßnahme	
Zur Reduzierung der Drehschwingungsbelastung auf die Antriebsmaschine wird zur Schwingungsisolierung eine drehelastische Klauenkupplung mit einem Elastomerzahnkranz eingesetzt. Durch diese Maßnahme konnten die auf die Antriebsmaschine resultierenden Wechselkräfte und damit auch die Geräuschanregung reduziert werden.	
Anwendungsgrenzen	
Unterschrift1: Anordnung der Maschinengruppe Abbildung bzw. Schallspektrum  Unterschrift2: Klauenkupplung mit Elastomerzahnkranz Schallpegel vorher: <input type="text"/> dB Schallpegel nachher: <input type="text"/> dB Differenzpegel: $\Delta L_p$ ca. 5 dB Kosten: 1500,- DM	

**Bild 5:** Datenblatt zur Beschreibung der Lärminderungsmaßnahmen und assoziiertes Konstruktionsbeispiel für die Schallübertragung /4/



**Bild 6:** Eingabefenster zur Zuordnung der Quelleneigenschaften /4/

Die Vereinfachungen der schalltechnischen Eigenschaften resultieren aus dem derzeit überproportional hohen Aufwand, der bei der Ermittlung des Frequenzspektrums, für die Anregung, des Übertragungs- und des Abstrahlverhaltens, mittels analytischer Berechnungen anfallen würde.

Die Vorgehens- und Funktionsweise des Informationssystems wird im Folgenden anhand eines Linearantriebs beispielhaft dargestellt. Der schalltechnisch betrachtenswerte Bereich besteht aus einem Getriebemotor, der an einem Strangpressprofil befestigt wurde.

Vor der eigentlichen schalltechnischen Analyse ist die Erfassung der Modellstruktur mit deren Elementen und Relationen erforderlich. Das Konstruktionsobjekt wird durch Komponenten, Baugruppen und Bauteile hierarchisch aufgebaut, wobei jedes Element zusätzlich textlich beschrieben werden kann.

Zu Beginn können alle das Projekt betreffenden Daten wie Kurzbezeichnung, Beschreibung und Projektverantwortliche erfasst werden.

## 6.1 Schalltechnische Analyse

Auf dem Weg zu passenden Lärminderungsmaßnahmen müssen zunächst die Quellen-, Übertragungs- und Abstrahleigenschaften für die relevanten Bauteile ermittelt werden. Bei der Zuordnung der Quelleneigenschaften werden im ersten Schritt die Schallentstehungsmechanismen von den "maschinenakustisch aktiven" Bauteilen erarbeitet und zugewiesen. Durch die Zuordnung erhält jedes dieser Bauteile eine oder mehrere Charakteristiken der Schallentstehung (Anregungsart und Frequenzbereich). **Bild 6** zeigt dazu am Beispiel eines Rotors (E-Motor) die Quelleneigenschaften.

Durch die Rotation des Rotors und der immer verbleibenden Restunwucht bildet sich eine radial umlaufende Kraft mit periodischen Frequenzanteilen, in der Regel im niederfrequenten Bereich. Ferner treten Drehmomentschwankungen aufgrund der Kommutierung auf. Durch die Festlegung der Schallentstehungsmechanismen werden automatisch deren Anregungscharakteristiken aus einer Datenbank übernommen und stehen zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

Die Auswahl des jeweiligen Schallentstehungsmechanismus erfolgt über einen hierarchisch gegliederten Katalog. Eine kurze Beschreibung der

Quellenart dient als "Hilfetext" zur weiteren Klarstellung der Schallentstehung und ihrer Merkmale.

Für eine bewertete Erarbeitung der Lärmminierungsmöglichkeiten ist zumindest eine Grobbewertung des jeweiligen Schallanteils zum Gesamtbeitrag nötig. Dieser Teilschritt stellt sich relativ schwierig dar, da eine Bewertung des Schallentstehungsmechanismus, hinsichtlich des Teilbeitrags zum Gesamtgeräusch von der verwendeten Bauart der Komponente, der Fertigungsgenauigkeit und vom Energieumsatz abhängt. So kann dieser Schritt, insbesondere vor der Erstellung eines Prototypens, nur "aus dem Bauch heraus" erfolgen. Die Genauigkeit der Bewertung steigt dabei mit zunehmender Erfahrung.

In einem fortgeschritteneren System können dann vorhandene Abschätz- bzw. Berechnungsverfahren die Bewertung "selbständig" durchführen.

Die Zuordnung der Übertragungs- und Abstrahleigenschaften gestaltet sich einfacher, da hier lediglich Übertragungswege und Abstrahlungsmöglichkeiten festgelegt werden müssen.

Die Bewertung legt hierbei fest, wie stark die jeweilige Schallart zum nächsten Bauteil übertragen bzw. vom jeweiligen Bauteil abgestrahlt wird. Realisiert wird dies durch eine Bewertung der zuvor erwähnten einzelnen Schallcharakteristika (Art und Frequenzbereich).

## 6.2 Ermittlung der Lärmminierungsmaßnahmen

Auf Basis der in der Analyse festgelegten akustischen Charakteristika ist das Informationssystem in der Lage, eigenständig maschinenakustisch anwendbare Lärmminierungsmaßnahmen aus der Datenbasis herauszufiltern.

**Projekt „Linearantrieb“ -> Lösungsfindung -> Quelleneigenschaften**

**Bauteil „Rotor“**

**Quelleneigenschaften: „Rotor“**

**Rotorunwucht**  
Unwuchten (statische Unwucht)

**Drehmomentstöße**  
Wechselkräfte aufgrund magnetischer Wechselfelder

**Aktivierte Quelleneigenschaft:**

**Bezeichnung:**  
Rotorunwucht

**Bewertung:**  
A

**Entstehung:**  
Unwuchten (statische Unwucht)

**Maßnahmen:**

1. Auswuchten durch Exzentergewichte, Massenreduktion ☒ A
2. Verkleinerung der beschleunigten Massen ☒ A
3. Reduzierung der Drehzahl ☒ C
4. Autotoleranz-System ☒ -

**Katalog „Lärmminierung“: Maßnahmen an Schallquellen**

**Abbildungen**

**Maßnahme:** Maschineneigenschaften u. konstr. Angaben | Weitere Informationen | Beispiele

**Entstehungsursache:**  
Unwuchten (statische Unwucht)

**Konstruktive Maßnahme:**  
Auswuchten (statisches gegebenfalls dynamisches) durch Exzentergewichte; Massenreduktion durch Bohrungen o.ä.

**Wirkungsweise:**  
Reduzierung der Schwerpunktsverlagerung

**Vorteil:**

**Nachteil:**  
zusätzlicher Fertigungsaufwand

**Konstruktive Berücksichtigung:**

**Gestaltungsregeln- und hinweise:**  
Verkleinerung der Massenkräfte durch Auswuchten der Rotoren oder Massenausgleich der verschiedenen Massen

**Browser**

- Eigenschaften von Schallquellen
- Maßnahmen zur Lärmminierung
  - Beeinflussungsmöglichkeiten bei der Schallentstehung
    - Luftschallquellen
    - Rüttelschallquellen
    - Körperschallquellen
    - Stoß
    - Zahnengriff
    - Massenkräfte (Unwuchten)
      - Unwuchten (statische Unwucht)
        - Auswuchten durch Exzentergewichte, Massenreduktion
        - Verkleinerung der beschleunigten Massen
        - Autotoleranz-System
        - Reduzierung der Drehzahl
      - Lagefehler der Wellenachse zur Drehachse
      - Verformungen aus thermischen und Elastizitätsgründen
    - Transitorische Massenkräfte
  - Rüttelgeräusche
  - Reibung und Selbstregung
  - Magnetfelder
- Beeinflussungsmöglichkeiten bei der Schallübertragung
- Beeinflussungsmöglichkeiten bei der Schallabstrahlung

Quelleneigenschaft anzeigen

Bild 7: Präsentation quellenbezogener Lärmminierungsmaßnahmen und Maßnahmendetailierung /4/



Die Ermittlung der schallquellenbezogenen Maßnahmen wird nicht über die Angabe der Schallcharakteristik durchgeführt, da eine direkte Zuordnung der Maßnahmen zu einem bestimmten Schallentstehungsmechanismus erfolgen kann. Daher werden in diesem Fall Lärminderungsmaßnahmen ohne jegliche Berechnungs- bzw. Ausschlußverfahren ausfindig gemacht.

Die Lärminderungsmaßnahmen zur Beeinflussung der Schallübertragung und -abstrahlung werden dabei über die im Schallfluß vorherrschenden Schallcharakteristika ermittelt, die sich aus den Eigenschaften der an dem Bauteil angeschlossenen Schallentstehungsmechanismen und den Übertragungs- und Abstrahleigenschaften ergeben. Hierüber kann schon eine erste Bewertung der Maßnahmen automatisch vorgenommen werden, indem ein Vergleich der vorherrschenden Schalleigenschaften mit denen der Lärminderungsmaßnahmen erfolgt.

**Bild 7** zeigt im Hintergrund liegenden Fenster das Ergebnis der quellenbezogenen Lärminderungsmaßnahmen für den Rotor.

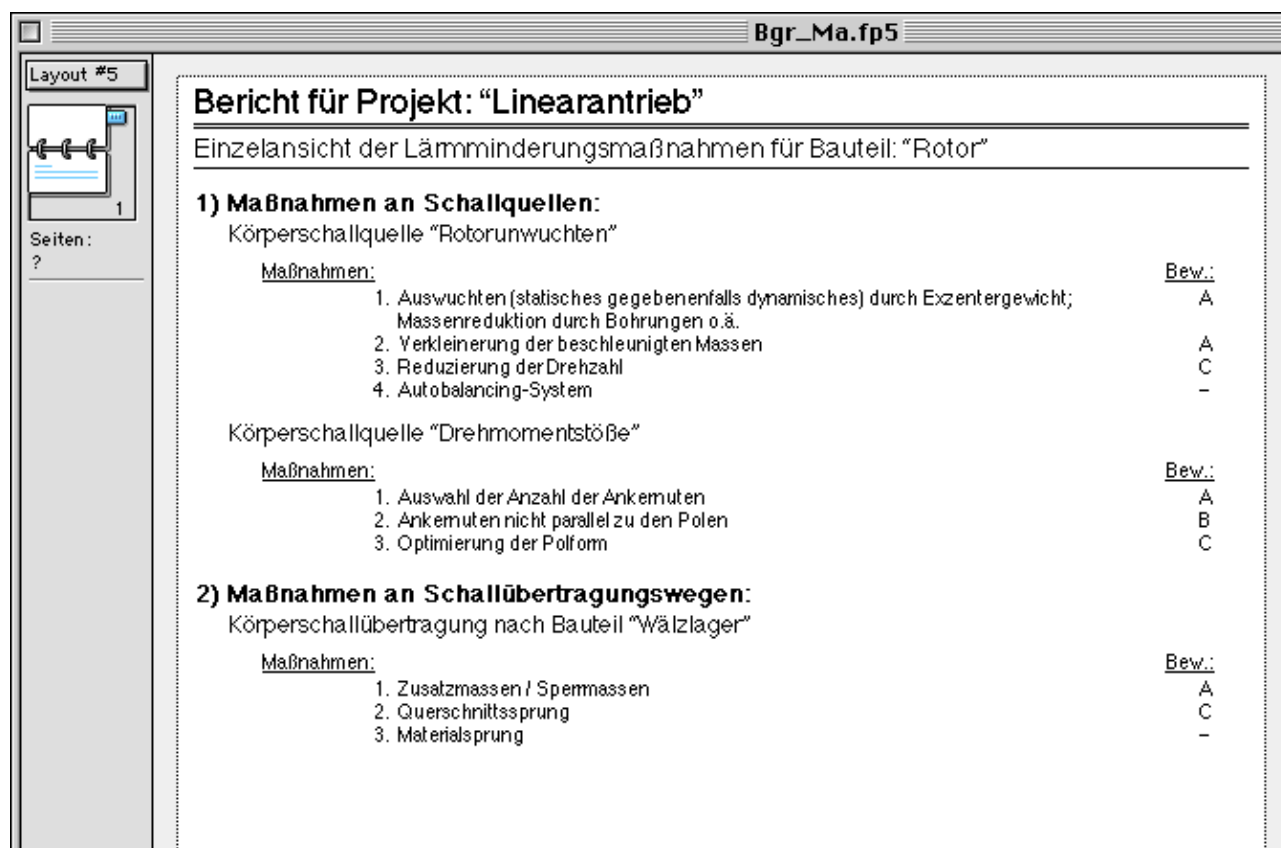
Jede dieser Maßnahmen steht für eine weitere Bewertung zur Verfügung. Zum Einen ist es möglich eine Maßnahme, z.B. aus technischen Gründen, auszuschließen. Zum Anderen können die verbliebenen Maßnahmen einem persönlichen Ranking

unterzogen werden, um somit Präferenzen darzustellen. Die Gründe für einen Ausschluß bzw. die starke Bevorzugung einer Lösung sollten und können dabei mit festgehalten werden.

Für jede der zuvor ermittelten Maßnahmen besteht die Möglichkeit, sich aus dem hinterlegten Lärminderungskatalog alle für eine weitere maschinenakustische und konstruktive Betrachtung notwendigen Informationen präsentieren zu lassen, **Bild 7** (Vordergrund). Zur übersichtlicheren Darstellung wurden die unterschiedlichen Informationen in Form von "Informationsmappen" abgelegt, über die auch ein Zugriff auf relevante Konstruktionsbeispiele möglich ist.

### 6.3 Ergebnisbericht

Zur zusammenfassenden Darstellung der Ergebnisse kann abschließend aus der theoretischen schalltechnischen Untersuchung ein Ergebnisbericht abgeleitet werden. Der Bericht beinhaltet alle während der Analyse und Lösungsfindung festgehaltenen Informationen sowie eine bewertete Darstellung der Lärminderungsmaßnahmen, die gegebenenfalls mit Konstruktionsbeispielen versehen sind, **Bild 8**.



**Bild 8:** Ergebnisbericht /4/

## 7 Zusammenfassung

Gesetzliche Bestimmungen und steigende Ansprüche von Seiten des Marktes führen zu restriktiveren maschinenakustischen Produkthanforderungen. Diese Tendenz verlangt die Berücksichtigung maschinenakustischer Aspekte ab den Frühphasen der Produktentwicklung, da hier der Konstrukteur bei der Erfüllung funktionaler Anforderungen gleichzeitig auch die maschinenakustischen Eigenschaften festlegt, die erst im Prototypenstadium zu Tage treten.

Verschärft wird die Problematik zudem durch den meist sehr geringen maschinenakustischen Kenntnisstand der Konstrukteure, so daß sich ein starker Handlungsbedarf zur Konstruktionsunterstützung ergibt. Aufgrund dieser Problematik wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Informationssystem entwickelt, daß dem Konstrukteur auf Basis einer schalltechnischen Analyse maschinenakustisches Problemlösungswissen unter der Berücksichtigung konstruktiver Gesichtspunkte gezielt zur Verfügung stellt.

Die Ermittlung und Erstellung der spezifischen Hilfsmittel erfolgte in starker Anlehnung an der Vorgehensweise und Struktur der EN ISO 11688-1. Zur Ermittlung spezifischer Hilfsmittel wurde der Konstruktionsprozess auf eine gezielte Einflußnahme unter maschinenakustischer Sicht untersucht und in einer systematisch aufgebauten Wissensbasis zusammengefasst. Für die schalltechnische Analyse, bei der u.a. auch die Verknüpfung der maschinenbaulichen Informationen mit maschinenakustischen Eigenschaften erfolgt, wurden strukturierte Hilfsmittel erarbeitet die insbesondere das Aufspüren von Schallquellen unterstützt. Als gesamtunterstützendes Werkzeug dient die Schallflußmodellierung.

Für die Lösungsfindung wurden Kataloge mit strukturierten Lärminderungsmaßnahmen aufgestellt, die konstruktive Lösungen zu bestimmten maschinenakustischen Problemstellungen aufzeigen. Zur Steigerung der Verständlichkeit wurden die Kataloge durch Konstruktionsbeispiele erweitert. Durch die Integration der Lärminderungskataloge in ein Rahmenkonzept wird die Verknüpfung einer schalltechnischen Analyse mit der Lösungsfindung ermöglicht. Die erarbeiteten Lärminderungskataloge stellen eine solide Basis für die systematische Erfassung und Bereitstellung maschinenakustischer Lärminderungsmaßnahmen dar. Durch die Gliederung nach den Beeinflussungsmöglichkeiten erhält der Konstrukteur ein Hilfsmittel mit dem er sich unter Verwendung eines

Schallflußmodells zielorientiert geeignete Lärminderungsmaßnahmen erarbeiten kann, die sich durch weitere konstruktive Angaben auf ihre Anwendbarkeit bewerten lassen. Die Umsetzung der Ergebnisse erfolgte mittels eines Software-Prototyps, der maschinenakustisches Faktenwissen unter konstruktionsmethodischen und Benutzer Gesichtspunkten ermöglicht. Die Entwicklung lärmarmere Produkte wird dadurch erleichtert und systematisch unterstützt.

### Literatur:

- /1/ DIN EN ISO 11688-1; Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - Teil 1: Planung, 1998; (ISO/TR 11688-1; 1995); Deutsche Fassung EN ISO 11688-1; 1998; Teil 2: (Norm-Entwurf) DIN 45685-2, Ausgabe:1998-11 Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - : Einführung in die Physik der Lärminderung durch konstruktive Maßnahmen (ISO/TR 11688-2:1998) Organisation. Genf, Dez. 1996.
- /3/ Dietz, P.; Gummersbach, F.: Informationsbasis zur Konstruktion lärmarmen Produkte; Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal Nr. 23; Clausthal 1998
- /2/ Dietz, P.; Gummersbach, F.: Entwicklung lärmarmen Produkte –Rechnergestütztes Beratungshilfen für den Konstrukteur-; VDI-Tagung Maschinenakustik '99, Wiesloch; VDI-Verlag 1999
- /4/ Gummersbach, Frank: Lärmarm konstruieren XIX; Schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten, - Ein Beitrag zum systematischen Zugriff auf konstruktive Lärminderungsmaßnahmen-; Dissertation TU Clausthal; April 2000 (Erscheint in der Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin)

## Lärmminderung setzt an der Quelle an - Schallquellenidentifikation mit Hilfe der Ordnungsanalyse

Backhaus, S.

*Der effizienteste Weg der Lärmminderung ist die, den Lärm gar nicht erst entstehen zu lassen oder zumindest schon die Entstehung des Schalls zu vermindern. Dazu müssen die stärksten Schallquellen jedoch erst identifiziert werden. Bei Maschinen mit drehzahlabhängigen Schallquellen ist die Ordnungsanalyse dafür das Mittel erster Wahl.*

*The most efficient way to reduce noise is to eliminate the sound source or at least to decrease the excitation forces. But before you can do that you have to identify the loudest acoustic mechanism. For machines with speed dependent sound sources the order tracking is an outstanding tool.*

### 1 Einleitung

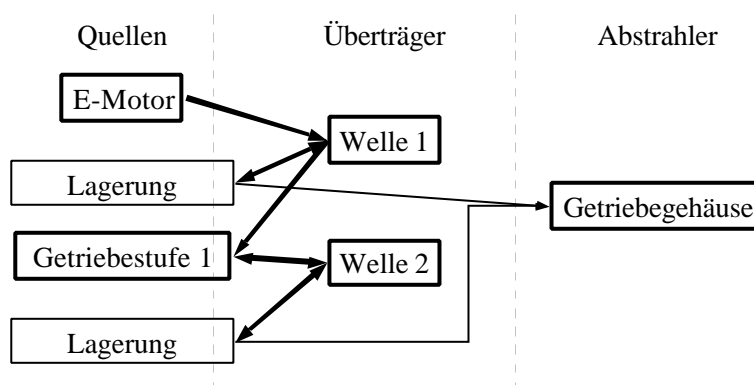
Wird von Lärmminderung gesprochen, denkt der Betroffene in den meisten Fällen an Lärmschutzwände, Maschinenkapselungen und Gehörschutz. Diese Maßnahmen kennt jeder aus seinem täglichen Umfeld. Es handelt sich dabei um sogenannte sekundäre Maßnahmen, die dem Lärmgeplagten zwar schnelle Linderung versprechen, aber teuer sind, viel Platz brauchen, das Gewicht erhöhen - die Liste ließe sich beliebig fortsetzen.

Die Maschinenakustik ist daher bemüht das Übel an der Wurzel zu packen und Lärm schon in der Entstehungsphase zu vermindern oder ganz zu vermeiden.

dabei aus dem Erfahrungs- und Fachwissen des Akustikers, seiner subjektiven Einschätzung und aus Richtlinien und Normen, zum Beispiel /6/.

Das Ergebnis dieser Untersuchung sind Bewertungstabellen für die Schallquellen, -übertrager und -abstrahler. Sie münden in einen Schallflussplan, der graphisch veranschaulicht, an welchen Komponenten der Maschine mit der Lärmminderung begonnen werden muss. Je größer der Einfluss einer Quelle ist, oder je stärker ein Körper überträgt bzw. abstrahlt, desto eher muss an dieser Stelle eingegriffen werden. Dazu werden die Bauteile je nach Größe ihres Einflusses mit verschiedenen starken Linien gekennzeichnet. Je dicker eine solche Linie ist, desto kritischer ist die Wirkung auf das Geräusch und desto eher muss hier Lärmminderung betrieben werden. Eine nähere Beschreibung der Schallflußmodellierung findet man bei /5/.

**Bild 1** zeigt den Schallflussplan einer Elektromotor - Getriebeeinheit.



**Bild 1:** Schallflussplan einer Elektromotor - Getriebeeinheit

### 2 Quellenidentifikation

#### 2.1 Theoretische Schallflussanalyse

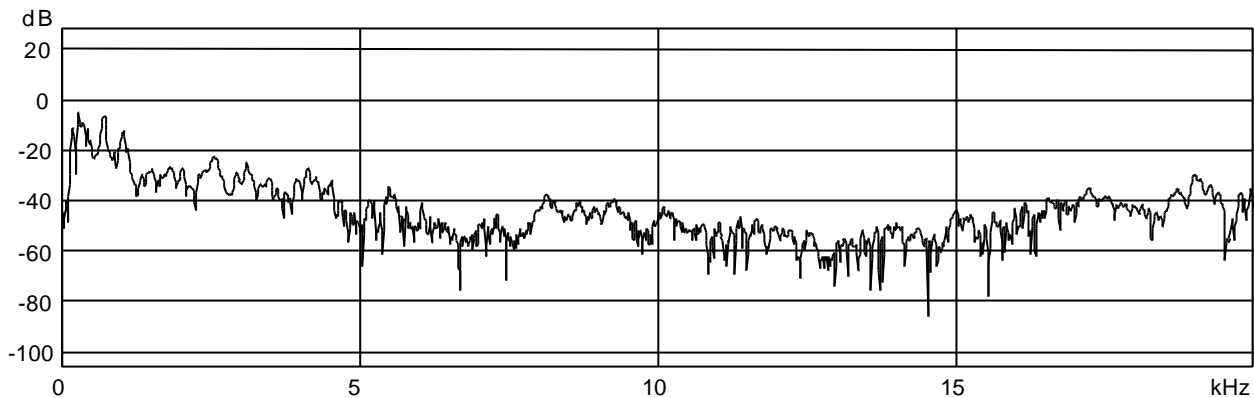
Um eine Schallquelle zu identifizieren gibt es verschiedene Möglichkeiten. Der erste Ansatz ist theoretisch. Die Maschine wird gedanklich in ihre Einzelkomponenten zerlegt und dann nach ihren maschinenakustischen Eigenschaften geordnet. Die Bewertung der Quellen-, Übertragungs- und Abstrahleigenschaften nach ihrer Relevanz erfolgt

Diese Art der Analyse eignet sich sowohl für Entwürfe als auch für bestehende Maschinen. Sie zeigt, an welchen Stellen der Eingriff des Akustikers nötig und sinnvoll ist.

Treten im Schallflussplan mehrere hoch priorisierte Schallquellen auf, stellt das während der Entwurfsphase kein Problem dar, da hier noch genügend Möglichkeiten zur Planung von Lärmminderungsmaßnahmen bestehen.

Bei bereits ausgeführten Konstruktionen oder Serienprodukten stellt sich die Problematik aber ganz anders dar. Es gilt herauszufinden, welche Quelle den stärksten Einfluss auf den "gehörten" Schall hat. Das heisst, die Analyse des als Luftschall abgestrahlten Körperschalls und dessen Zuordnung zu den Quellen.

zu untersuchenden Struktur zeitgleich mit einem Drehzahlsignal aufgezeichnet. Von jedem Schwingungssignal werden dann Fast Fourier Transformationen (FFT) abgeleitet. Dabei wird die Amplitude in dB über der Frequenz in Hz aufgetragen. Ursprünglich wurden Quellenidentifikationen ausschließlich anhand so gewonnener Spektren durchgeführt. Der Nachteil dabei ist jedoch, dass



**Bild 2:** Fast Fourier Transformation eines Zeitsignals

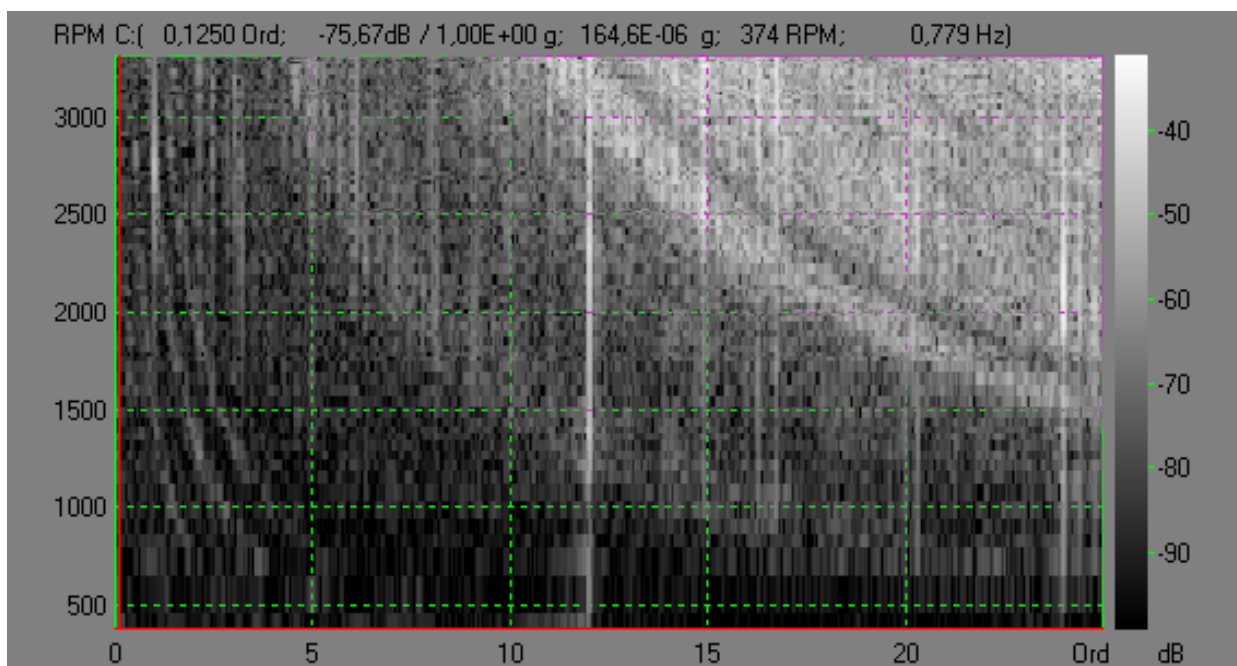
## 2.2 Ordnungsanalyse

Ein hervorragendes Analysewerkzeug dafür ist das sogenannte Order Tracking, auch Ordnungsanalyse genannt. Hiermit können mit relativ einfachen Hilfsmitteln direkte Rückschlüsse auf drehzahlabhängige Schallquellen bei Maschinen mit rotierenden Bauteilen geschlossen werden.

Um eine Ordnungsanalyse durchzuführen werden zunächst Schwingungs- oder Luftschallsignale der

die so gewonnenen Ergebnisse nur für eine bestimmte Drehzahl gültig sind. Somit lässt sich nur schwer feststellen, ob es sich bei den besonders hervortretenden Frequenzen um Strukturresonanzen der Maschine oder um drehzahlabhängige Frequenzen der Schallquellen handelt. **Bild 2** zeigt eine solche FFT.

Wird jeweils für eine bestimmte Drehzahl oder für ein Drehzahlband eine FFT gewonnen und diese



**Bild 3:** Ordnungsanalyse einer Elektromotor - Getriebeeinheit

übereinandergeschichtet, erhält man ein Farbspektrum bei dem die Amplitude durch die Farbe kodiert ist. Für eine Ordnungsanalyse wird dieses Farbspektrum dann auf die zugehörige Drehzahl, in der Regel die Hauptdrehzahl (die erste Ordnung), durch Division der Frequenzachse normiert. Die Hauptdrehzahl liegt zum Beispiel bei Getrieben am Eingang, bei Motoren an der Kurbelwelle etc. an. Anhand dieses Ordnungsspektrums kann untersucht werden, bei welcher Harmonischen der Bezugsdrehzahl Anregungen auftreten und ob festfrequente Geräuschanteile (z.B. Eigenfrequenzen) vorhanden sind.

**Bild 3** zeigt die Ordnungsanalyse einer Elektromotor - Getriebeeinheit. Auf der Abszisse sind die Ordnungen, auf der Ordinate die Drehzahl dargestellt. Die Farbe (hier Graustufen) gibt die Amplitude der Signale an.

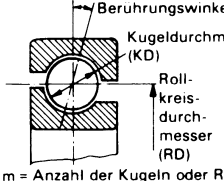
Die in der Senkrechten auftretenden Linien sind die sogenannten Ordnungen. Es handelt sich dabei um Signale deren Frequenz sich direkt proportional mit der Drehzahl ändert. In **Bild 3** sind die 1., 12. und 24. Ordnung besonders stark ausgeprägt.

Die von links oben nach rechts unten verlaufenden Hyperbeln sind dagegen Linien gleicher Frequenz und stellen drehzahlunabhängige Geräuschanteile, zum Beispiel Eigenfrequenzen der Struktur, dar.

Eigenfrequenzen sind vom Aufbau der Maschine abhängig und können durch Modalanalysen einzelnen Bauteilen oder Gehäuseflächen zugeordnet werden.

Die Ordnungen lassen sich den drehenden Bauteilen zuordnen, da jedes drehende Bauteil charakteristische Schwingungen induziert. Eine Welle erzeugt Unwuchtschwingungen, die direkt proportional zur Motordrehzahl sind. Getrieberäder erzeugen unter anderem Schwingungen, die von der Ritzelzähnezahl und der jeweiligen Drehzahl abhängen. Bei Wälz- und Gleitlagern kann eine ähnliche Zuordnung vorgenommen werden. **Tabelle 1** zeigt dazu einen Auszug der Tabelle "Diagnose zur Fehlererkennung aus dem Schwingungsspektrum" aus /1/ mit den für das genannte Beispiel wichtigsten Schallquellen.

Die in **Bild 3** dargestellte Ordnungsanalyse zeigt besondere Auffälligkeiten bei der 1., 12. und 24.

Schadensursache	Dominante Frequenz	Richtung	Bemerkung
Unwucht an rotierenden Teilen	1 x n	Radial	Gewöhnlich die Ursache bei stärkeren Schwingungen an der Maschine
Fluchtfehler & verbogene Welle	Gewöhnlich n Oftmals 2 n Manchmal 3 & 4 x n	Radial & Axial	Eine übliche Fehlerquelle
Beschädigte Wälzlager	Stoßimpulse für die individuellen Lagerkomponenten*  Auch Schwingungen bei sehr hohen Frequenzen (20 bis 60kHz)	Radial & Axial	Ungleiche Schwingungspegel, oftmals mit Stößen.  *Stoßimpulse:  $\text{Defekt am Außenring } f(\text{Hz}) = \frac{m}{2} f_r \left(1 - \frac{KD}{RD} \cos \beta\right)$ $\text{Defekt am Innenring } f(\text{Hz}) = \frac{m}{2} f_r \left(1 + \frac{KD}{RD} \cos \beta\right)$ $\text{Defekt an der Kugel } f(\text{Hz}) = \frac{RD}{KD} f_r \left[1 - \left(\frac{KD}{RD}\right)^2 \cos^2 \beta\right]$ <small>m = Anzahl der Kugeln oder Rollen f<sub>r</sub> = Relativedrehzahl s<sup>-1</sup> zwischen dem inneren u. äußeren Lauftring</small>
Beschädigte oder verschlissene Zahnräder	Zahneingriffsfrequenzen (Wellendrehzahl x Zähnezahl) und deren Harmonische	Radial & Axial	Seitenbänder um die Zahneingriffsfrequenzen deuten auf Modulation (z.B. infolge Exzentrizität) mit Frequenzen hin, die den Abständen der Seitenbänder entsprechen. Normalerweise mit sehr schmalbandigen Analysen auffindbar.
Mechanisches Spiel	2 x n		Auch Sub- und Interharmonische

**Tabelle 1:** Auszug der Tabelle "Diagnose zur Fehlererkennung aus dem Schwingungsspektrum" aus /1/

Motorordnung. Die erste Ordnung lässt auf eine Unwucht des Motorläufers schließen. Die 12. Ordnung ist charakteristisch für die Drehmoment-schwankungen des hier eingesetzten Gleichstrom - Elektromotors. Sie ergibt sich aus den hier eingesetzten Läufer mit sechs Polpaaren und der Kommutierung wodurch es zu einem mit dem zweifachen der Polpaarzahl pulsierendem Drehmoment kommt. Die 24. Ordnung ist die 2. Harmonische der bei der 12. Ordnung auftretenden Schwingung.

Somit lassen sich aus der obigen Analyse die Unwucht des Läufers und dessen Drehmoment-schwankungen als Hauptschallquellen identifizieren.

### 3 Zusammenfassung

Bevor mit Lärminderungen direkt an den Schallquelle begonnen werden kann, müssen diese zunächst identifiziert werden. Dabei reicht es allerdings nicht aus nur alle Schallquellen aufzuzählen, sie müssen auch bezüglich ihrer Stärke klassifiziert werden. Eine Möglichkeit dafür ist die theoretische Schallflussanalyse bei der mit Hilfe von Erfahrungswissen und Abschätzhilfen jede Einzelkomponente einer Maschine untersucht wird. Werden allerdings zwei Quellen gleich bewertet, gilt es herauszufinden welche denn tatsächlich die stärkere von beiden ist. Bei Maschinen mit drehzahlabhängigen Schallquellen bietet sich dafür die Ordnungsanalyse als hervorragendes Werkzeug an.

### 4 Literatur

- /1/ Kolerus, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen, 3., erweiterte Auflage, Renningen-Malmsheim, expert - Verlag, 2000
- /2/ Fasold, W.; Kraak, W.; Schirmer, W.: Taschenbuch Akustik Teil 1, 1. Auflage, Berlin, VEB Verlag Technik, 1984
- /3/ Oros: OR25 Operating manual Version 4.0, Meylan (Frankreich), Oros France, 2000
- /4/ Beck, H.-P.; Wolf, A.: Manuskript zur Vorlesung: Elektrische Energietechnik: eine Einführung in die Energiewandlung, Clausthal-Zellerfeld, Institut für Elektrische Energietechnik, 1998
- /5/ Gummersbach, Frank: Lärmarm konstruieren XIX; Schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten, - Ein Beitrag zum systematischen Zugriff auf konstruktive Lärminderungsmaßnahmen-; Dissertation TU Clausthal; April 2000 (Erscheint in der

Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin)

- /6/ DIN EN ISO 11688-1; Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - Teil 1: Planung, 1998; (ISO/TR 11688-1; 1995); Deutsche Fassung EN ISO 11688-1; 1998; Teil 2: (Norm-Entwurf) DIN 45685-2, Ausgabe:1998-11 Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - : Einführung in die Physik der Lärminderung durch konstruktive Maßnahmen (ISO/TR 11688-2:1998) Organisation. Genf, Dez. 1996.

## Sicherheitsanalyse einer Reaktionsschwingmühle

Bönig, S.; Grünendick, T.

*Während der Prototypenentwicklung bieten systematische Methoden zum Identifizieren von Gefahrenquellen sowohl Möglichkeiten zur Störfallvorsorge als auch zur Prozessoptimierung durch Ergänzung sicherheitsbetreffender Anforderungen. Am Beispiel einer Reaktionsschwingmühle werden diese Zusammenhänge nachfolgend dargestellt.*

*The use of safety analysis methods in prototype design helps to prevent hazards as well as to optimize the process adding safety relevant requirements. These relations are shown for a reaction-swing-mill.*

### 1 Einleitung

Das Ziel einer systematisch durchgeführten sicherheitsanalytischen Betrachtung der Reaktionsschwingmühle ist es, die zum jetzigen Entwicklungszeitpunkt erkennbaren kritische Punkte aufzudecken und zu beseitigen.

Aufgrund des innovativen Verfahrens des „reaktiven Rohr-Schwing-Mahlens“ liegen bislang nur wenige Erkenntnisse (ausgenommen der Laborversuche, der Untersuchung des Eigenfrequenzverhaltens der Schwingmühle, FEM-Berechnungen) hinsichtlich Betriebsverhalten, Werkstoffverhalten und Störanfälligkeit der Reaktionsmühle, insbesondere im Zusammenwirken mit den angrenzenden Anlagenkomponenten, dem Stoffverhalten sowie unter der geplanten Verfahrensweise (zunächst diskontinuierlich, später kontinuierlich) vor. Durch das vom Kunden geforderte Endprodukt (Trichlorsilan) sind auch Art und Menge der Einsatzstoffe festgelegt; nicht alle Prozessparameter, Hilfsstoffe und insbesondere Komponenten zur Nachbereitung der Reaktionsprodukte sind aber bis jetzt im Detail bekannt und können erst z.T. während des Betriebes optimiert werden. Ein iteratives Vorgehen ist sowohl bei der Durchführung der Entwicklungsarbeiten als auch der Sicherheitsanalyse demzufolge hier unerlässlich.

Zum Aufdecken potentieller Störungen soll die KOMB-Analyse zum Einsatz kommen, die durch Anwendung sicherheitstechnischer Lösungskataloge

auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen wenn möglich unterstützt werden soll.

Um auch während der zukünftigen Entwicklungsarbeiten bis hin zum Betrieb der Reaktionsmühle noch über Kenntnisse hinsichtlich potentieller Störungsquellen aber auch sicherheitsrelevanter Komponenten zu verfügen, sollen diese strukturiert sowohl in den Entwicklungsunterlagen (Anforderungslisten) als auch schließlich aufbereitet in den Betriebsanweisungen dokumentiert werden. Letztere können beispielsweise konkrete Verhaltensmaßnahmen (oder auch Verbote) bei Abweichungen des bestimmungsgemäßen Betriebes der Anlage beinhalten.

Aufgrund der für dieses Verfahren erforderlichen Arbeitsstoffe (Gefahrstoffe) und des benötigten hohen mechanischen Energieeintrages können Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb der zu entwickelnden verfahrenstechnischen Maschine nicht nur zu Funktionsstörungen oder einer Reduzierung der Produktqualität bzw. -quantität führen. Die Zerstörung der Maschine, unerwünschte chemische Reaktionen und die daraus resultierenden Störfälle mit:

- unerwünschten erhebliche Stofffreisetzungen und / oder
- (Folge-) Brand bzw.
- Explosion

sind ebenfalls unter bestimmten Umständen denkbar und müssen durch wirksame konstruktive, anlagentechnische oder organisatorische Maßnahmen zum Schutz der Anlagenbetreuer, der Umwelt und der Anlage selbst verhindert werden.

### 2 Beschreibung der Anlage

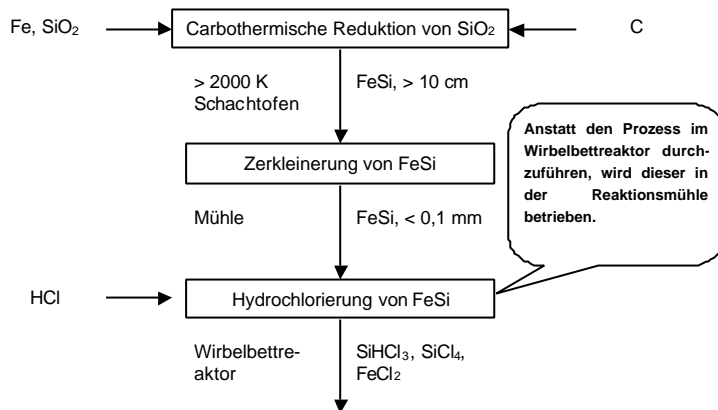
#### 2.1 Chemische Reaktionstechnik

Die Hydrochlorierung von Ferrosilizium ist die Umsetzung von metallisch verunreinigtem Silizium mit Chlorwasserstoff zu Trichlorsilan, dies ist für die Herstellung von hochreinem Silizium ein technisch bedeutender Prozess.

Das Rohsilizium wird durch Reduktion von Quarz mit Kohle unter Zugabe von Eisenschrott im Lichtbogenofen bei Temperaturen oberhalb von 1700°C



gewonnen. Das so erzeugte Rohsilizium wird in einer Mühle zerkleinert, und die sich anschließende Hydrochlorierung zu Chlorsilanen erfolgt bevorzugt in Wirbelschichtreaktoren bei Temperaturen oberhalb von 300°C. Diese Reaktion benötigt eine hohe Aktivierungsenergie, die in Form von thermischer Energie zugeführt wird. Die beiden Hauptprodukte der Hydrochlorierung sind Trichlorsilan und Siliziumtetrachlorid, vgl. **Bild 1**. Diese werden dann



gieaufwendige Herstellung von reinem Silizium eine Verbesserung.

Durch die Zusammenlegung der beiden Prozessschritte wird die Oberfläche durch ständiges Zerkleinern des Feststoffes vergrößert und der gezielte Ausschluß von Sauerstoff verhindert die Bildung von passivierenden Oxidschichten auf der Siliziumoberfläche. Damit steht immer frische Bruchflächen dem Reaktionsgas zur Verfügung.

Neben diesem Frischflächeneffekt wird der Feststoff ergänzend mechanisch aktiviert, wodurch eine Absenkung der noch zuzuführenden Aktivierungsenergie erfolgt. Dieser Einfluss tritt umso stärker hervor, je niedriger die Temperatur ist. Damit entspricht die Reaktionsgeschwindigkeit mit simultaner Zerkleinerung bei 25°C formal der Reaktionsgeschwindigkeit ohne Zerkleinerung bei 270°C.

**Bild 1:** Klassische Prozessstufen der Chlorsilanerzeugung

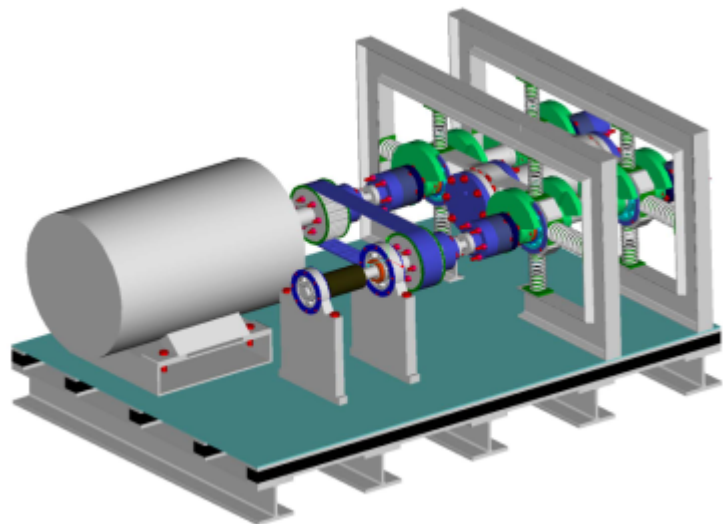
voneinander getrennt (in Rektifikationskolonnen). Das so hochgereinigte Trichlorsilan wird im nächsten Prozessschritt in einem Siemens-Reaktor mit Wasserstoff bei ca. 1100°C zum hochreinen polykristallinen Silizium reduziert; hieran kann sich das Ziehen von Silizium-Einkristallen anschließen.

Die bisher konstruktiv voneinander getrennte Durchführung der Zerkleinerung und der chemischen Reaktion birgt das Problem, dass während der Zerkleinerung, der Zwischenlagerung und des Transports die Oberfläche des Rohsilizium durch Reaktion mit Luftsauerstoff passiviert wird. Dies verursacht eine verringerte Reaktionsgeschwindigkeit. Durch die Bildung von Eisenchlorid, dem eine reaktionshemmende Wirkung zugeschrieben wird, wird die Diffusion des Chlorwasserstoffs zum Reaktionspartner Silizium stark behindert.

Bei der Reaktionsschwingmühle wird nun der Prozess der chemischen Reaktion mit der ohnehin notwendigen Mahlung verbunden und damit die eingebrachte mechanische Energie neben der Mahlung auch für die Aktivierung des chemischen Prozesses eingesetzt. Somit ergibt sich, indem man Mahlung und Reaktion von Ferrosilizium betreibt und dabei synergetische Effekte nutzt, für die ener-

## 2.2 Konstruktion

Das Lösungskonzept für den Betrieb einer kontinuierlichen Reaktionsmühle mit Beschleunigungen bis zu 80g und Amplituden bis 20 mm zeigt **Bild 2**. Der Mahlbehälter ist in einem Federrahmen schwingend gelagert. Es wurde ein Antriebssystem gewählt, dass über die entsprechende Einstellung der Exzentrerscheiben eine Kreisschwingung unterschiedlicher Amplituden erzeugt. Der Schwingrahmen ist mit dem Antrieb durch Gleichlaufgelenkwellen verbunden, aus Gründen des dynamischen Verhaltens ist die Konstruktion symmetrisch ausgeführt.

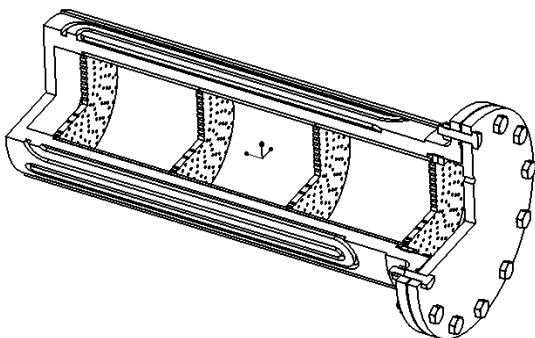


**Bild 2:** Pro/E Schattendarstellung der Reaktionsmühle

Der Reaktionsbehälter (**Bild 3**) hat die Grundform eines einseitig geschlossenen Zylinders. Die offene Seite dieses Zylinders ist mit einer Blindflanschverbindung versehen, die den Zugriff zum Innenraum ermöglicht. Der Behälterinnenraum selber bietet eine lichte Länge von 350 mm bei einem lichten Durchmesser von 100 mm. Form und Volumen des Innenraums ergeben sich aus der Umsatzvorgabe von 25 g/h Silizium. Damit erhält man nach entsprechender Berechnung folgende Volumen- und Massendurchsätze:

FeSi 90	28 g/h
HCl	72 l/h
Auslaß (gasförmig; $\text{SiHCl}_3$ , $\text{H}_2$ )	42 l/h
$\text{FeCl}_2$	59 g/h

Der Innenraum ist vertikal in verschiedene Bereiche aufgeteilt. Von der Bodenseite aus gesehen kommt zuerst der Bereich, in den das Ferrosilizium und HCl-Gas in den Behälter eingeschleust wird. Daran schließen sich drei Mahlräume mit einer Länge von jeweils 100 mm an. In diesen findet unter Beteiligung von Mahlkörpern die Reaktion statt, als deren Endprodukt u.a. die gasförmigen Chlorsilane entstehen. Auf der Flanschseite des Mahlbehälters befindet sich dann der Ausschleusungsbereich, durch den die festen Reaktionsprodukte aus dem Mahlbehälter abgeführt werden.



**Bild 3:** Mahl- und Reaktionsbehälter

Die einzelnen Bereiche im Inneren des Behälters sind durch Lochscheiben voneinander getrennt. Durch die Geometrie dieser Lochscheiben (Dicke der Scheiben, Anzahl, Orientierung und Durchmesser der Löcher) wird der Mahlguttransport des Behälters und damit die Verweilzeit des Ferrosiliziums in den Mahlräumen bestimmt. Außerdem trennen die Lochscheiben das Mahlgut von den Mahlkörpern. Die Zu- und Abführung der festen und gasförmigen Ausgangs- und Endprodukte der Reaktion finden über entsprechend dimensionierte Ein- und Auslässe auf der Boden- bzw. Flanschseite des

Mahlbehälters statt, an die sich jeweils Leitungen anschließen.

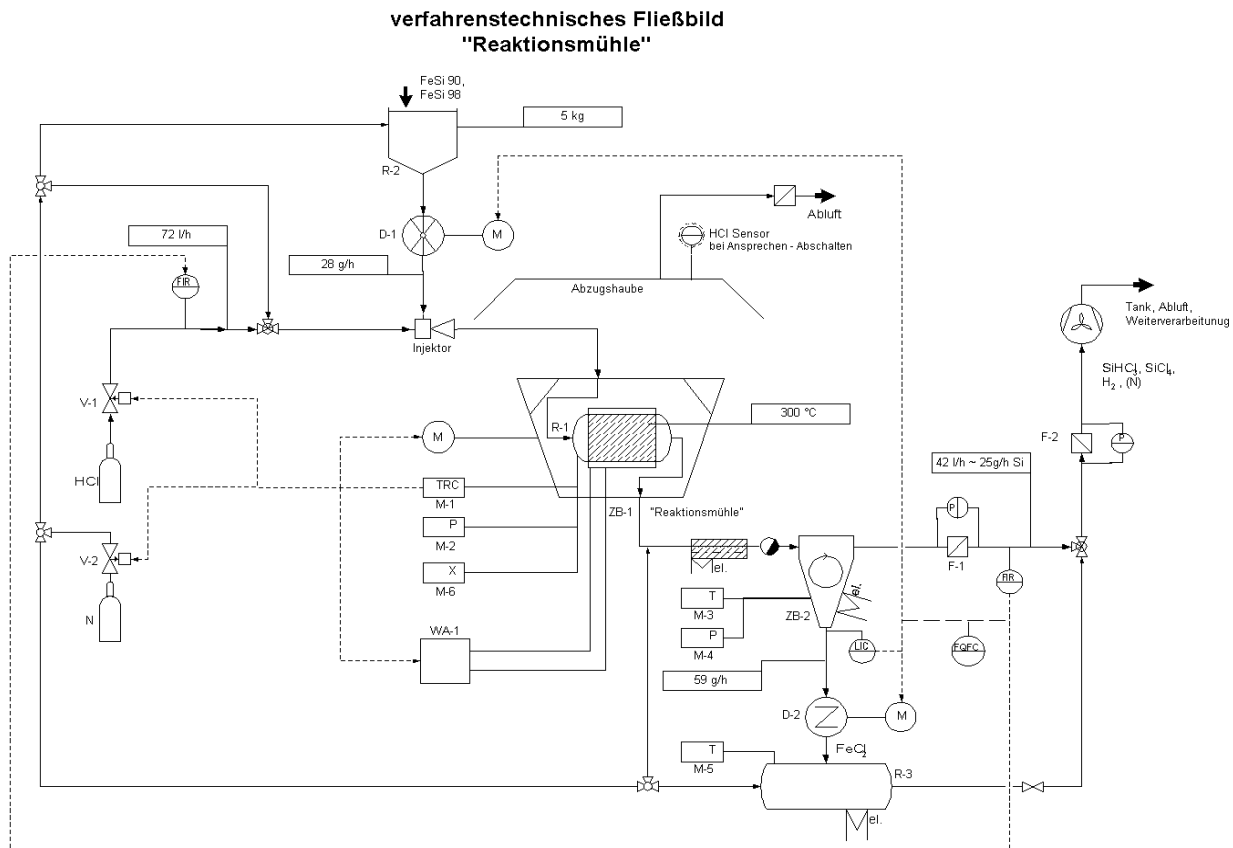
Zur Beheizung des Mahlbehälters sind in seiner Außenwandung Kanäle eingefräst, über die mittels eines entsprechenden flüssigen Mediums die Behälterschale und damit auch der Inhalt des Behälters beheizt bzw. gekühlt wird. Die Anschlüsse für die Zu- und Abführung des Heizmediums befinden sich an der Bodenseite des Mahlbehälters; von dort aus führen Zuleitungen zum außen liegenden Wärmetauscher. Um den Behälter auch während des Betriebs, d.h. während des Fortganges der Reaktion, hinreichend genau beheizen und kühlen zu können, ist auf der Bodenseite des Behälters ein Temperaturnehmter in die Wandung eingelassen.

Die kontinuierliche Zuführung der Ausgangsstoffe wird mit Hilfe eines Leitungssystems verwirklicht. Als Verbindung kommen Schneidringverbinder zur Anwendung, die die Gasdichtigkeit des Systems gewährleisten sollen. Aufgrund der geringen Menge FeSi, die pro Stunde benötigt wird, genügt ein Vorratsbehälter mit einem Fassungsvermögen von 5 kg den Anforderungen. Die Zumessung des FeSi erfolgt mit Hilfe einer Zellenradschleuse. Im Anschluß der Zellenradschleuse wird das HCl-Gas aus einer Gasflasche über einen Injektor zugeführt. Der Transport des Feststoffes in den Leitungen zum Behälter hin wird von den übertragenen Vibration bzw. der Schwerkraft gewährleistet.

Der Auslauf selbst ist an der unteren Seite des Mahlbehälters vorgesehen und mündet über den Zyklon in einen beheizten Vorratsbehälter. Die Aerosuspension darf die Grenztemperatur von 70°C während der Filtrierung und des Transportes nicht unterschreiten, da sie ansonsten flüssig wird und damit als aggressives Medium den Mahlbehälter und die Verbindungsleitungen stärker korrosiv beanspruchen kann.

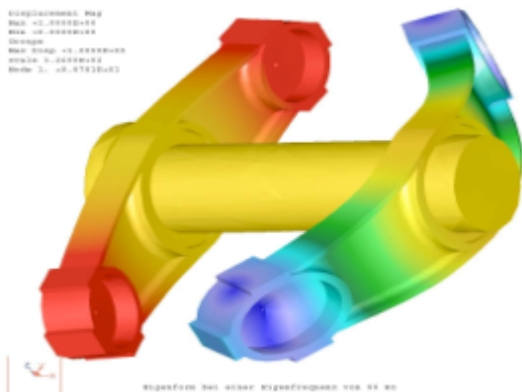
Die kombinierte Zyklon-Sinterfiltereinheit oberhalb des Vorratsbehälters übernimmt die Trennung des fest-gasförmigen Gemisches. Die Staubteilchen müssen bis zu einer Korngröße von 7 µm aus dem Gas gefiltert werden.

Den Aufbau und die Funktion der verfahrenstechnischen Anlage zur Herstellung von Silanen ( $\text{SiHCl}_3$ ,  $\text{SiCl}_4$ ) zeigt **Bild 4**.



**Bild 4:** Verfahrensfließbild der Reaktionsschwingmühle

Die Reaktionsschwingmühle stellt ein Feder-Masse-System dar. Ein solches System muss vor zerstörend wirkenden Eigenfrequenzen, die hier im vorliegenden Fall im Anfahr- und Abfahrbereich liegen und wesentlich höhere Beschleunigungen als 80g bewirken, geschützt werden. Dies kann nur dann ohne Schädigung erfolgen, wenn ein leistungsstarker Motor die Eigenfrequenzbereiche schnell durchfahren kann. In **Bild 5** ist exemplarisch eine Eigenform des Ersatzmodells der Reaktionsschwingmühle (hier, bei einer Eigenfrequenz von 98 Hz) dargestellt.



**Bild 5:** Eigenform des Ersatzmodells

### 3 Sicherheitsanalytische Betrachtungen zur Unterstützung der Entwicklungsarbeiten

Zum Zeitpunkt der Analyse stehen folgende Unterlagen bzw. Informationen zur Verfügung:

- Verfahrensbeschreibung,
- Stoffdaten,
- vorläufige Anforderungslisten der zu entwickelnden Schwingmühle,
- Konstruktionsunterlagen des Reaktionsbehälters,
- Vorläufiges vt-Fließbild sowie
- der Erfahrungsbericht des Pilotanlagenbetreuers.

Kernpunkt der sicherheitstechnischen Untersuchung ist zunächst der schwingende Reaktionsbehälter R-1, siehe **Bild 4**, in dem die chemische Reaktion des Ferrosiliciums mit dem HCl unter Wärmezufuhr und mechanischer Aktivierung stattfindet. Der Reaktionsbehälter muss den eingeplanten bekannten chemischen, mechanischen und thermischen Belastungen in allen Betriebsphasen standhalten. Dies wird neben einer optimierten *Prozessführung* (Temperatur, Druck, Verweilzeit, Anzahl und Art der Mahlkörper, Schwingfrequenz, u.a.) bei

der *Auslegung* (Wandstärke, Geometrie, Verbindungselemente) und der *Werkstoffwahl* berücksichtigt. Zusätzlich muss es möglich sein, Prozessabweichungen beheben (z.B. durch regelungstechnische Maßnahmen) bzw. die gesamte Anlage bei Funktionsstörungen einzelner Anlagenteile in einen sicheren Zustand fahren zu können, um Gefährdungen wirksam zu verhindern. Die angrenzenden Teilsysteme, wie die Zufuhr der Einsatzstoffe, die Inertisierung, die Schwingvorrichtung und die Trennung der Reaktionsprodukte, müssen sinnvollerweise mit in die Untersuchung einbezogen werden, da nicht immer der Ort der Störung aufgrund des Stoff- und Energietransportes identisch mit dem Ort der eigentlichen Störungsursache ist.

In einem ersten Schritt werden mit Hilfe einer Reaktionsmatrix, in der sämtliche im System vorhandene Stoffe (d.h. Einsatz-, Hilfs-, Werk- und Umgebungsstoffe) gegeneinander aufgetragen werden, die Stoff-Stoff- bzw. Stoff-Werkstoff-Wechselwirkungen bewertet. Ohne genaue Kenntnisse des Aufbaus des Systems bzw. der Bauart der Komponenten sind z.B. folgende Punkte zu beachten:

- HCl darf nicht austreten, d.h. sämtliche Dichtungen müssen HCl beständig sein.
- Luft muss vor Betrieb mit Stickstoff vollständig aus der Anlage verdrängt sein.
- Die Temperatur des Produktenstromes muss immer  $>70^{\circ}\text{C}$  sein.

Anschließend werden für die Komponenten des Systems Maßnahmen zur Erhöhung der Anlagensicherheit vorgeschlagen, die auf Grundlage der aktuellen Informationen (vor allem aus dem vt-Fließbild) mit Hilfe der KOMB-Analyse erarbeitet werden.

Die Durchführung dieser prospektiven Analyse, die eine Kombination aus der HAZOP-Analyse und der Matrix-Analyse darstellt, siehe /1/, ist besonders für komplexe Systeme geeignet, da verhindert wird, dass durch Beseitigung eines Fehlers neue Störungen hervorgerufen werden: Erst wenn sämtliche Ursache-Wirkungs-Beziehungen im betrachteten System unter Angabe der betroffenen Komponenten ermittelt worden sind, werden bei der KOMB-Analyse die notwendigen Gegenmaß-

nahmen im Team festgelegt und deren Wirksamkeit bewertet (siehe Matrizen in **Bild 6**).

Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen	
(1)	keine oder unvollständige Erfüllung der Funktion
(2)	unerwünschte chemische Reaktionen und Effekte
(3)	unerwünschte physikalische Reaktionen und Effekte
(4)	unerwünschte thermische Effekte
(5)	erhebliche Stofffreisetzungen

**Tab. 1:** Allgemeine Störungen in vt- Anlagen und Maschinen

Um zum jetzigen Zeitpunkt potentielle Störungen am Reaktionsbehälter zu *identifizieren*, ist es neben der Prüfung auf allgemeine, standardisierte Störungen hilfreich (siehe **Tab. 1** und /2/), durch rückblickendes Abstrahieren auf die tatsächlich "vorhandenen" Funktionen der zu entwickelnden Komponente zu schließen, wie in **Tab. 2** aufgeführt. Anhand der verschiedenen (Elementar-) Funktionen (und auch der Grundoperationen und chemischen Reaktion) werden in Verbindung mit den Leitworten des HAZOP-Verfahrens /3/ (NEIN, NICHT, ZU VIEL; ZU WENIG, usw. ) dann systematisch Störungen und auch deren Ursachen abgeleitet sowie anlagenspezifische Auswirkungen ermittelt, siehe Formblatt 1, **Tab. 3**.

Durch den Einsatz Sicherheitstechnischer Maßnahmenkataloge, wie sie in /2/ beschrieben sind, wird diese Arbeit erheblich erleichtert.

Gerade die Funktionen, die zu Beginn der Planung noch nicht berücksichtigt wurden, wie beispielsweise *Stoff trennen – Sieben* oder *Stoff leiten- druck- und schwingfördern*, sind aufgrund der verschiedenen Möglichkeiten von Störungsursachen, näher zu analysieren.

Für den Reaktionsbehälter ergeben sich aufgrund

"Schwingmühle": Teilsystem Reaktionsbehälter		
Elementar-funktion ←	Grundoperationen Chem. Reaktionen ←	ausführende Komponenten auf Bauartebene
Stoff leiten	Dosieren	Schnittstelle Behälteröffnung / Zufuhrleitung
Stoff umwandeln (chemisch)	Hydrochlorieren	Reaktion der Ausgangsstoffe in beheiztem, schwingendem Behälter (Zylinder)
Stoff vereinigen	Mischen	Ausgangsstoffe / Mahlkörper im Behälter
Stoffabmessung ändern	Zerkleinern (durch Kugelmahlen)	Schwingende Behälterinnenwände und Mahlkörper
Stoff trennen	Sieben (Mahlkörper/ Reaktionsprodukte)	Lochböden im Behälterinnenraum
Stoff speichern	Verweilzeit einstellen	Behältergeometrie (Lochscheiben)
Stoff leiten	Druck- und schwingfördern	Schwingungsanregung des Behälters, Druckdifferenz des Gases gegenüber Umgebung
Stoff leiten	Stoff austragen	Schnittstelle Behälteröffnung / Abfuhrleitung
Phasenzustand einstellen	Wärme / Kälte zuführen	Wärmeaustausch über Heiz-/Kühlmittelstrom in Behälteraußenwandbereich
Energie leiten	Mechanische Energie zuführen (Schwingungen)	Beschleunigung und Schwingungsanregung des Behälters über Spannelemente
Energie speichern	Temperatur halten	Behälterwände
Stoff trennen	Inertisieren (Luft mit $\text{N}_2$ verdrängen)	Spülung des Behälters vor und nach Betrieb und in Gefahrensituationen

**Tab. 2:** Aufspaltung des Teilsystems „Reaktionsbehälter“ in Elementarfunktionen, Grundoperationen und ausführende Komponenten

Komponente: Reaktionsbehälter R-1; Modus: Betrieb		
Störungen Fehler	Ursachen	Auswirkungen
(1) 1. Undichtigkeiten	U1 Anschlüsse undicht (Korrosion) U2 Deckeldichtung fehlerhaft	A1 geringe Stofffreisetzungen A2 Gefahr für Bedienungspersonal A14 Explosionsgefahr
(1) 2. Verstopfung der Lochscheiben	U3 unzul. Abrieb der Mahlkörper U4 Konstruktionsfehler (falsche Geometrie d. Lochscheiben) U5 unzul. hoher Kugelfüllgrad	A3 Gefahr unkontroll. exothermer Reaktion A4 T-anstieg in Behälter A5 T-anstieg in Produktaufbereitung A6 P-anstieg im Zufuhrsystem A7 keine /verminderte Produktförderung aus Austrittsöffnung A8 sonstige Auswirkungen unbekannt
...	...	...
(1) 4. keine / unvollst. Zerkleinerung	U7 keine Zufuhr FeSi 90 o. FeSi98 U8 Schwingfrequenz unzureichend U9 unzul. niedriger Kugelfüllgrad	A9 keine Bildung von Trichlorsilan A 11 verminderter Umsatz von Trichlorsilan A 10 Gefahr der Werkstoffkorrosion durch HCl A2 geringe Stofffreisetzungen
(1) 5. keine Reaktion	U10 keine Zufuhr HCl U8 Schwingfrequenz unzureichend U7 keine Zufuhr FeSi 90 o. FeSi98	A9 keine Bildung von Trichlorsilan A 10 Gefahr der Werkstoffkorrosion durch HCl A2 geringe Stofffreisetzungen
...	...	...

**Tab. 3:** Ausschnitt aus dem Formblatt 1 der KOMB-Analyse

der ermittelten Funktionsabweichungen bzw. der allgemeinen Störungen auf diese Weise folgende realistische Störungen, die im Laufe der Entwicklung noch zu konkretisieren sind:

1. Undichtigkeiten,
2. Verstopfung der Lochscheiben,
3. Verformung der Lochscheiben,
4. keine/unvollständige Zerkleinerung,
5. keine Reaktion,
6. unvollständige Reaktion,
7. kein Feststoffeintritt durch Eintrittsöffnung,
8. kein Feststoffaustritt durch Austrittsöffnung,
9. unerwünschte chemische Reaktionen,
10. unzulässige Wärmezufuhr,
11. unzulässige Wärmeabfuhr,
12. unerwünschte (erhebliche) Stofffreisetzungen.

Bei verbleibendem hohem Störungsrisiko (mit „schwerwiegenden“ Auswirkungen) müssen gegebenenfalls Funktionen in ihrer Reihenfolge verändert, ergänzt oder sogar ersetzt werden. Änderungen sind auch dann notwendig, wenn Probleme erst während des Probetriebes des Prototyps auftreten, die nicht beseitigt werden können. Gerade aber dieser Schritt soll ja mit der Durchführung einer Sicherheitsanalyse vermieden werden.

#### 4 Ergebnis der Analyse

Abschließend wird anhand einiger Beispiele erläutert, wie die Sicherheit beim Betrieb der Reaktionsmühle erhöht werden kann.

Bezüglich der Störungen des Reaktionsbehälters können bereits folgende Punkte aufgezeigt werden:

- Eine **Druckentlastung** muss bei Überschreitung eines unzulässig hohen Druckes eingeplant werden, um ein Bersten des Behälters zu vermeiden. Das austretende Gas-Feststoffgemisch ist in einem entsprechend ausgelegten Tank aufzufangen. Der Ort und die Ausführbarkeit der Sicherheitsapparatur sind noch zu überprüfen.
- Aufgrund des bislang unbekannten Verhaltens des Behälters unter Einsatzbedingungen ist die Notwendigkeit einer **Abreißsicherung** zur Vermeidung des Stoffaustrittes zu klären.

- Versuche sind einzuplanen, um das **Abriebverhalten** der Mahlkörper bei unterschiedlicher Beladung zu untersuchen. Anhand dieser Ergebnisse muss dann eine Begrenzung der zulässigen Betriebsstunden stattfinden.
- **Strömungsversuche** mit einem Ersatzfeststoff bei unterschiedlichem Mahlbehälterfüllgrad sind im schwingenden Reaktor notwendig, um die Verstopfungsneigung der Lochscheiben sowie die der Ein- und Austrittsöffnung zu untersuchen. Die tatsächliche Verweilzeit der Stoffe im Reaktionsbehälter ist zu überprüfen.
- Das **Eigenfrequenzverhalten** ist bei unterschiedlicher Beladung des Behälters zu untersuchen.
- Es ist zu klären, welchen Einfluss die Schwingungserregung des Behälters auf den Transport des Kühl-/Heizmittels in der Behälteraußenwand und damit auf die **Wärmeübertragungsleistung** hat.
- Vor jeder Inbetriebnahme ist eine **Dichtigkeitsprüfung** des Behälters vorzunehmen, so dass ein Stoffaustritt durch Fertigungs- oder Montagefehler vermieden wird. Fehlerhafte Dichtungen und Verbindungsschläuche sind so erkennbar und können rechtzeitig ersetzt werden. Die notwendigen Absperrorgane sind zu ergänzen.

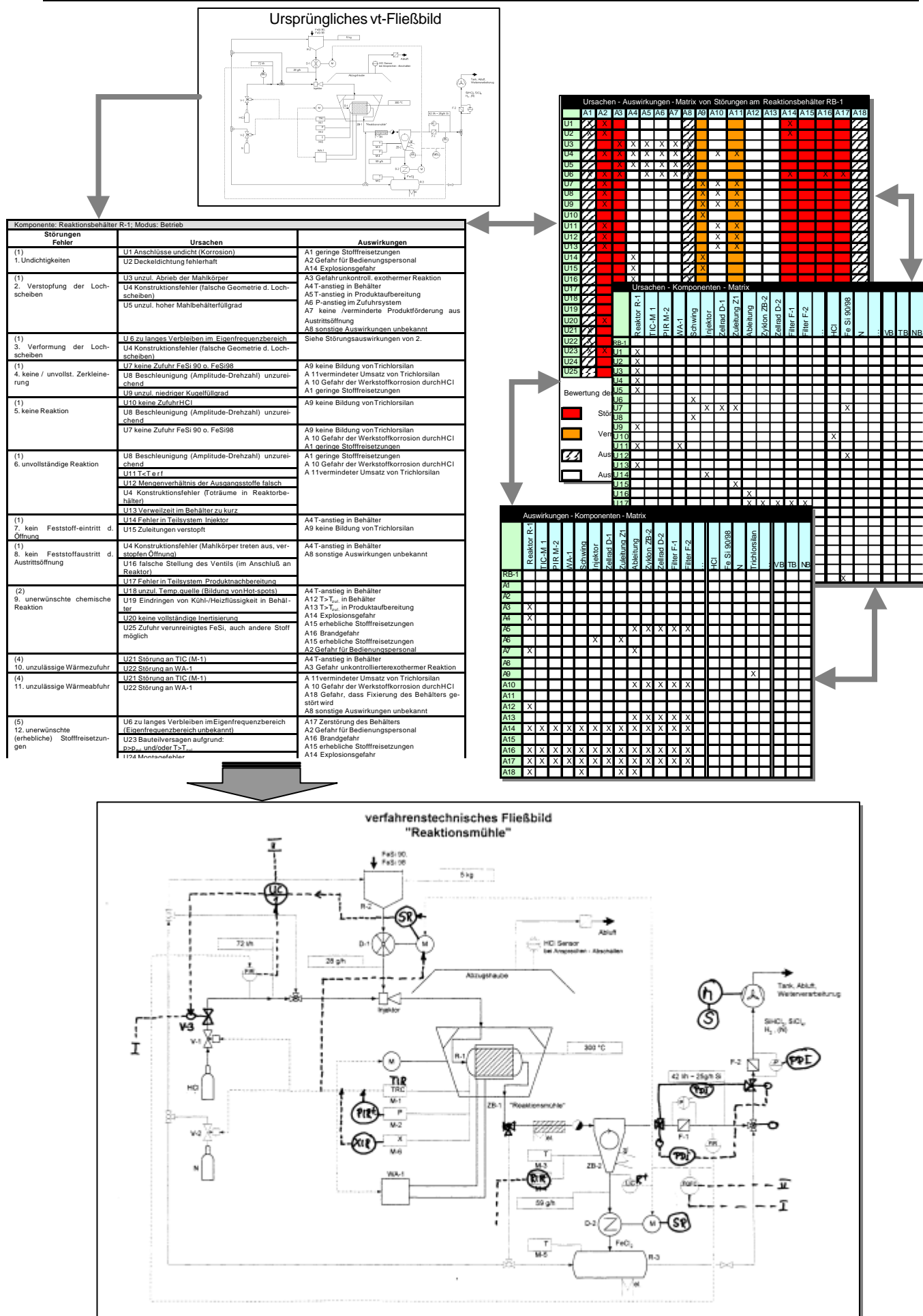


Bild 6: Ablauf der Sicherheitsanalyse

Abschließend sind einige Maßnahmen aufgelistet, die die angrenzenden Komponenten des Reaktors betreffen:

- Es ist zu überprüfen, inwieweit eine **Austrags-hilfe** zur Vermeidung der Brückenbildung des FeSi im Behälter R-2 erforderlich ist.
- Die Zellradschleuse D-1 ist so auszulegen, dass eine **Spülung** mit Stickstoff möglich ist.
- Weiterhin muss geklärt werden, wie der tatsächlich in den Reaktor eintretende FeSi - Massenstrom gemessen werden kann. Auch ist eine **Massenstrom-Verhältnisregelung** auf Produktseite sinnvoll, die bei Grenzwertüberschreitung sowohl die HCl- als auch die FeSi-Zufuhr absperrt, den Motor der Mühle stoppt und die Reaktorkühlung sowie den Stickstoffeintrag initiiert.
- Um zu gewährleisten, dass bei Störungen am Reaktor auch die nachfolgenden Komponenten mit Stickstoff durchspült werden können, ist eine **zusätzliche Gasleitung** zur Endproduktleitung erforderlich.
- Im Falle einer Störung (vor allem auch Stromausfall) muss das Ventil V-1 automatisch in den geschlossenen Zustand fallen und das Ventil V-2 den maximal eingestellten Massenstrom durchlassen.
- Eine **Bypassschaltung** zur Umgehung des Filters F-1 ist notwendig, um den erforderlichen Druckverlust über dem Zyklon zur Aufrechterhaltung der Abscheideleistung auch bei Zusetzen des Filters F-1 zu gewährleisten und vor allem einen Druckanstieg im Zyklon zu vermeiden.
- Aufgrund der Druckverluste in der Anlage ist ein **Gebälse** zur Erzeugung der erf. Druckdifferenz notwendig. Nach konkreter Festlegung des Betriebsdruckes können hier Aussagen getroffen werden, die auch Einfluss auf die Auslegung des Zyklons und der beiden Filter haben.
- Es ist zu klären, ob die bisherige eingeplante **Messung des Füllstandes** am Zyklon zur alleinigen Messung des FeCl<sub>2</sub>-Massenstromes zulässig ist.

Die Analyse zeigt, dass die Messung sicherheitsrelevanter Prozessparameter noch nicht ausreichend in der Planung berücksichtigt worden ist. Zudem ist es nicht möglich, die Anlage bei Störungen gefahrlos herunterzufahren. Das kontinuierliche Zu-

und Abführen der Edukte bzw. Produkte ist nicht immer gewährleistet; Fehler können erst evtl. zu spät bemerkt und damit nicht behoben werden. Für das Anfahren, den Betrieb und das Abfahren der Anlage sind Betriebsanweisungen zu erstellen, die neben der persönlichen Schutzausrüstung auch direkte Maßnahmen im Falle einer Störung enthalten, wenn diese nicht automatisch ausgeführt werden bzw. nicht ausführbar sind.

Wichtig für den Versuchsingenieur / Anlagenbediener ist auch die Kenntnis über die zu treffenden Maßnahmen bei einem Unfall beim Umgang mit den Gefahrstoffen und die Möglichkeit, die Anlage schnell über gut zugängliche Not-Aus-Schalter in den sicheren Zustand fahren zu können.

## 5 Zusammenfassung

Während bislang eher die Systematik entwicklungsbegleitender Sicherheitsanalysen im Vordergrund stand, siehe /2/, werden hier an einem konkreten Beispiel Maßnahmen zur Risikobegrenzung für eine verfahrenstechnische Maschine erarbeitet. Zu diesem Zweck werden der geplante Prozess und die wichtigsten Komponenten der Reaktions-schwingmühle vorgestellt sowie einzelne Zwischenergebnisse der Analyse an Beispielen erläutert. Aufgrund der erlangten Erkenntnisse wird nicht nur das Risiko eines Störfalles vermindert. Ebenso wird bislang personengebundenen Wissen systematisch dokumentiert und die Notwendigkeit einer besonderen Betrachtungsweise beim Betrieb einer komplexen Anlage vermittelt, die bereits in der Maschinenentwicklung Berücksichtigung finden muss.

## 6 Literatur

- /1/ Dietz, P.; Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: Institutsmitteilung Nr. 22, IMW Clausthal 1997
- /2/ Dietz, P.; Bönig, S.: Institutsmitteilung Nr. 24, IMW Clausthal 1999
- /3/ Bartels, K.; Hoffmann, H.; Rossinelli, L.: Risikobegrenzung in der Chemie, PAAG-Verfahren (HAZOP), Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie, Heidelberg 1990



## **Buchveröffentlichung zum Sonderforschungsbereich 180 „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“**

Birkholz, H.; Große, A.

*Zum Abschluss des Sonderforschungsbereiches 180 wurden die Ergebnisse in Form eines Buches mit dem Titel „Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen“ beim Springer-Verlag veröffentlicht. Der folgende Artikel gibt einen kurzen Überblick über den Inhalt.*

*The results of the special research project 180 have been published by a book titled „Design of Process Engineering Machinery“. The following article gives a short overview on its contents.*

### **1 Einleitung**

Der an der TU Clausthal seit 1986 angesiedelte Sonderforschungsbereich 180 (SFB 180) beschäftigt sich mit der Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen thermischen, chemischen und mechanischen Belastungen und zeichnet sich insbesondere durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Bereiche Verfahrenstechnik, Maschinenbau, Chemie und Werkstoffwissenschaften aus.

In den Forschungsaktivitäten wurden z.B. Prozessgeschwindigkeiten von über 200 m/s in Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen, Gasumwälzanlagen bei Temperaturen über 1200°C und Eintrag mechanischer Energie durch Beschleunigungen über 60 g realisiert. Außerdem wendet sich der Sonderforschungsbereich der Grundlagenforschung in folgenden Bereichen zu:

- Transport und Verarbeitung von Gas-Feststoffgemischen
- Zerkleinerung am Beispiel von Shreddersystemen und Schneidmühlen
- Transport von Gasen und Gas-Feststoff-Gemischen bei hohen Temperaturen
- Reaktormaschinen, wie sie z.B. für das chemische Kunststoffrecycling, für Entschwefelungs- oder Ultraschallverfahren benötigt werden
- Übergreifende Grundlagenforschung mit den Schwerpunkten Werkstoff- und Verschleißforschung, Konstruktionsmethodik sowie Ergonomie und Umwelt.

Damit lässt sich die Zielsetzung des Sonderforschungsbereiches enger fassen zu: Grundlagen der Auslegung und prozessgerechten Ausführung für

Wandlung, Verarbeitung und Transport von Stoffgemischen unter Einbeziehung der Grundlagen zur festigkeits-, werkstoff- und fertigungsgerechten Gestaltung.

In den Projekten des Sonderforschungsbereiches 180 waren im Mittel 36 Wissenschaftler aus 13 Instituten beteiligt, 14 Hochschullehrer übernahmen dabei die Leitung.

Der SFB 180 endete am 31.12.1999. Als zusammenfassende Veröffentlichung ist ein Fachbuch entstanden, welches Ende dieses Jahres im Springer-Verlag (ISBN 3-540-67670-8) erscheint.

### **2 Gliederung des Buches**

Das Buch gliedert sich in folgende Hauptkapitel:

1. Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
2. Belastungen, Dynamik, Akustik
3. Verfahrenstechnische Maschinen unter vorwiegend mechanischen Beanspruchungen
4. Verfahrenstechnische Maschinen unter vorwiegend thermischen, chemischen und abrasiven Beanspruchungen
5. Werkstoff- und Fertigungstechnik.

Kapitel 1 beinhaltet die Konstruktionssystematik für die integrierte Prozess- und Maschinenentwicklung in der Verfahrenstechnik, die Behandlung von Anforderungen in der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen sowie einen Beitrag zur Sicherheitstechnik in der Verfahrenstechnik.

Die Konstruktionssystematik wird im Zusammenspiel mit den Phasen der Produktentwicklung anhand von drei Beispielen erläutert. Bei der Behandlung von Anforderungen wird auf die Anforderungen durch den Auftraggeber, des eigenen Unternehmens und der Umgebung eingegangen. Die Sicherheitstechnik stellt die Methoden wie z.B. HAZOP, FMEA oder KOMB-Analyse sowie ein System zur wissensbasierten Sicherheitsanalyse (WISI) vor.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den Besonderheiten in Belastung und Beanspruchung verfahrenstechnischer Maschinen. Im Einzelnen wird die Beanspruchung

chung von Komponenten verfahrenstechnischer Maschinen und Möglichkeiten der Beeinflussung, die konstruktive Gestaltung von Hochgeschwindigkeitsrotoren, Einsätzen und Verbindungen in verfahrenstechnische Maschinen, die Aspekte zur dynamischen Auslegung und Optimierung von Laborzentrifugen sowie die Lärminderungsmaßnahmen an schnelllaufenden Prallzerkleinerungsmaschinen untersucht.

Kapitel 3 behandelt verfahrenstechnische Maschinen unter vorwiegend mechanischen Beanspruchungen. Dabei wird die Feinsttrennung in Fliehkraft-Gegenstromsichtern bzw. Abweiseradsichtern und die Feinstzerkleinerung in einer zweistufigen Rotorprallmühle beschrieben. Des Weiteren werden Untersuchungen zur Zerkleinerung von Kunststoffen in einer Schneidmühle und einem Pendelschlagwerk gemacht und beschrieben.

Kapitel 4 enthält Aspekte zu verfahrenstechnischen Maschinen unter vorwiegend thermischen, chemischen und abrasiven Beanspruchungen. Zu Beginn wird die Entwicklung keramischer Ventilatoren für die Umwälzung heißer Gase bis 1350°C vorgestellt. Danach folgt eine Beschreibung der verfahrenstechnischen Prozesse und Konstruktionen für Reaktionsmühlen, Kreislaufreaktoren, Ultraschallreaktoren sowie Reaktionsverdichtern. Für den Reaktionsverdichter besteht ein eigenes Kapitel zur Werkstofftechnik. Außerdem werden die Polymermodifizierung in einer Schwingmühle und die trockene Entschwefelung von Abgasen im Niedertemperaturbereich erläutert.

Kapitel 5 umfasst Themen aus dem Bereich Werkstoff- und Fertigungstechnik im Zusammenhang mit der Verfahrenstechnik. Dazu zählen das Auftragschweißen von Verschleißschutzschichten mit definierter Gefügemorphologie, Metall-Keramik-Verbindungen durch Diffusionsschweißen für den Einsatz in verfahrenstechnischen Maschinen, der Hochtemperaturoxidationsschutz von C/C-Werkstoffen auf Mullitbasis und die Hartbearbeitung von Industriekeramik. Ferner sind Untersuchungen zur Temperaturwechselbeständigkeit insbesondere von keramischen Werkstoffen als Grundlage für den Hochtemperaturmaschinenbau durchgeführt und dokumentiert worden.

Das Buch verfügt darüber hinaus über eine Zusammenfassung sämtlicher Veröffentlichungen, Vorträge und Dissertationen des Sonderforschungsbereiches 180.

### 3 Zusammenfassung

Mit diesem Buch bekommt der Leser einen breitgefächerten Überblick über verfahrenstechnische Prozesse und Maschinen. Dabei haben alle Beiträge einen starken Bezug zur praktischen Anwendung. Das Buch liefert zahlreiche Auslegungsformeln und Diagramme, mit denen der Anwender aus Industrie und Forschung neue Prozesse und Maschinen auslegen kann. Des Weiteren bietet das Buch vielschichtige Anregungen für den Entwickler. Die Beiträge enthalten teilweise tabellarische Übersichten. Der Text wird durch zahlreiche Abbildungen illustriert.

## Intensivstudienprogramm Maschinenbau an der TU Clausthal

Schäfer, G.; Wächter, M.:

*Die Industrie sucht dringend Hochschulabsolventen des Maschinenbaus. Im Rahmen des Intensivstudienprogramms ist der Diplomabschluß nach einem optimal betreuten und hochkonzentrierten Studium nach vier Jahren möglich.*

*At this Moment in time Industry is desperate for graduates in mechanical engineering. With the intensive study programme it is possible to contain a Masters Degree (English) which is equivalent to a Diploma Degree (German) after four years. The studies developed in the best possible way on a highly concentrated level.*

### 1 Intention

An der Technischen Universität Clausthal ist zum Wintersemester 2000/2001 das Intensivstudienprogramm Maschinenbau als Modellversuch angelaufen. Die gesunkene Zahl an Absolventen eines Ingenieurstudienganges und die anziehende Konjunktur in der Maschinenbaubranche sorgen für eine verstärkte Nachfrage nach Hochschulabsolventen, durch dieses Studienprogramm werden dem Arbeitsmarkt nach vier Jahren Diplomingenieure angeboten werden, die hochkonzentriert und motiviert ihr Studium verfolgt haben.

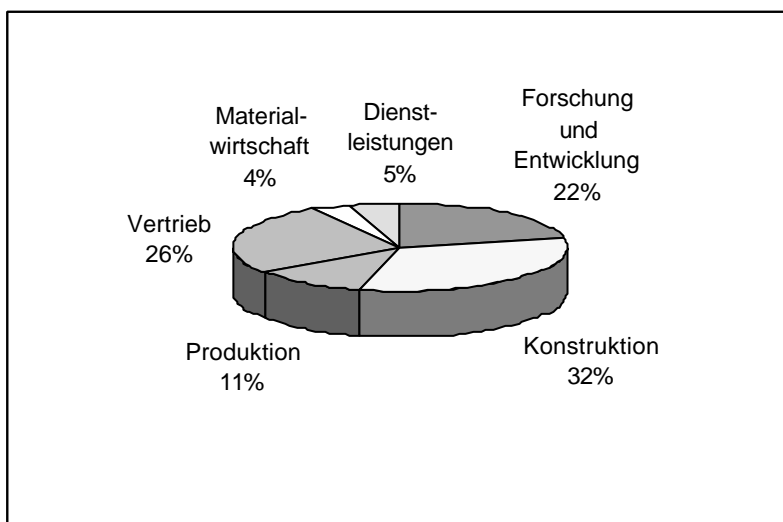
### 2 Maschinenbau - Studium mit guten Aussichten

Mit nahezu einer Million Beschäftigten und 230 Milliarden DM Jahresumsatz ist der Maschinen- und Anlagenbau der größte deutsche Industriezweig. Mit einem Anteil von 57 Prozent erzielt er weit über die Hälfte seines Umsatzes über den Export und ist einer der Weltmarktführer. Die ausgeprägt interdisziplinäre Forschung und Entwicklung sowie die weltweite Nachfrage nach Know-how aus Deutschland haben den Maschinenbau als Ingenieurwissenschaft hierzulande zu einer herausragenden Disziplin gemacht. Die Industrie sucht dringend Hochschulabsolventen des Maschinenbaus. Diese Nachfrage

wird auch in den nächsten fünf bis zehn Jahren nicht gedeckt werden können. Damit sind die Arbeitsmarktaussichten für Maschinenbauingenieure auch in der Zukunft gesichert. Diese besondere Situation ist Ihre Chance.

Das größte Arbeitspotenzial bietet die Industrie mit einem Löwenanteil mittlerer und kleinerer Unternehmen (rund 80 Prozent der deutschen Betriebe im Maschinen- und Anlagenbau beschäftigen weniger als 200 Mitarbeiter). Betriebe dieser Größen sind äußerst flexibel und nutzen ihre Chancen auch auf fernen Märkten.

So etwa sind deutsche Firmen des Maschinenbaus überall dort zu finden, wo die Infrastruktur ausgebaut wird, Straßen, Häfen, Bahnstrecken, Flughäfen, Staudämme oder Kraftwerke entstehen. Andere sind dort mit von der Partie, wo die Industrialisierung durch neue Produktionsmittel an Qualität gewinnt. Maschinenbau-Ingenieure werden in der Produktionstechnik, Verkehrstechnik, Medizintechnik oder dem chemischen Anlagenbau gebraucht – überall dort, wo neue Produkte unsere Umwelt lebenswerter machen. Und gerade in mittleren und kleinen Unternehmen sind Ingenieure als „Generalisten“ gefragt, da hier die Bandbreite ihrer Arbeit einfach weiter gesteckt ist als in Großbetrieben.



**Bild 1:** Ingenieure im Maschinenbau: Einstellungsbedarf nach Unternehmensbereichen

### 3 Studienprogrammkonzept

Das Intensivstudienprogramm ist ein zusätzliches Angebot der Hochschule. Das bedeutet, dass es wie bisher den normalen Studiengang Maschinenbau gibt. Wesentlich ist, dass der Studierende nicht nur zwischen beiden Angeboten wählen, sondern auch wechseln kann. Die Verkürzung der Studiedauer beim Intensivstudienprogramm wird durch zusätzliche Lehrveranstaltungen in den Wochen zwischen den Vorlesungszeiten der Semester möglich. Das erforderliche Industriepraktikum von 26 Wochen wird ebenso in die vorlesungsfreie Zeit integriert, das Praktikantenamt der Hochschule ist bei der Organisation des Praktikums behilflich. Das Studium ist so aufgebaut, dass die Studierenden pro Studienjahr sechs Wochen Urlaub erhalten. In **Bild 2** ist ein Ablaufplan des Studiums mit Freizeit, Semester und zusätzlichen Phasen dargestellt.

In der Vorphase werden die Studierenden in die Hochschule eingeführt und haben die Möglichkeit in Brückenkursen ihr Schulwissen in Mathematik und Physik aufzufrischen, daneben haben ausländische Studierende die Möglichkeit einen Deutschkurs zu besuchen.

Das Grundstudium vermittelt die notwendigen naturwissenschaftlichen Voraussetzungen des „Handwerkszeuges“ in Mathematik, Chemie, Physik und Grundlagen der Ingenieurwissenschaften in Elektrotechnik, Thermodynamik, Konstruktion, Fertigung, Werkstoffen und Bauteilprüfung und erstreckt sich über die beiden ersten Studienjahre.

Im Hauptstudium wählen die Studierenden zwischen den beiden Vertiefungsrichtungen

„Konstruktion, Fertigung und Betrieb“

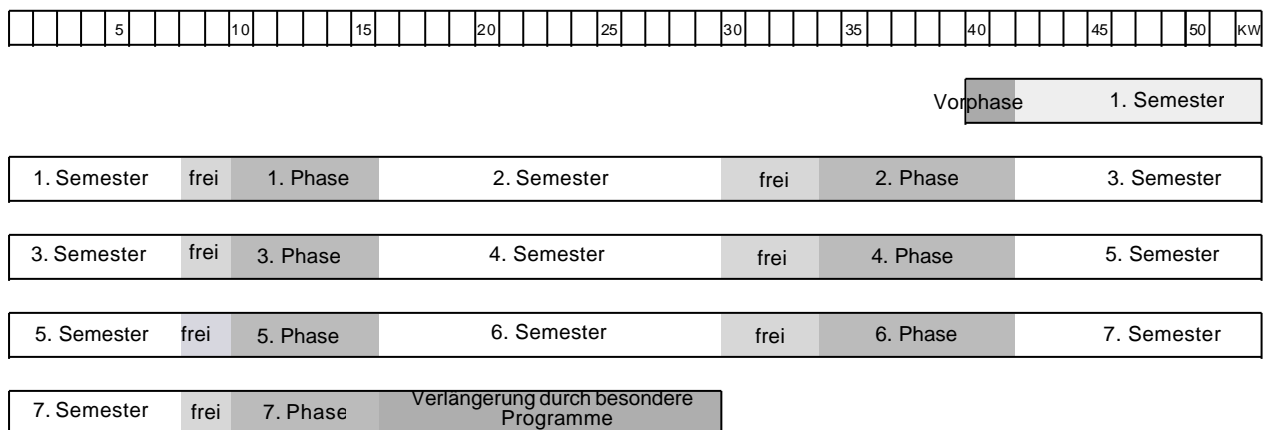
„Elektrotechnik und Systemautomatisierung“.

Für beide Vertiefungsrichtungen ist der Modellstudienplan in **Bild 3** und **Bild 4** dargestellt. Die Schwerpunktsfächer können je nach Neigung gewählt werden, dabei steht das gesamte Lehrangebot des Fachbereiches nach Maßgabe der Studienordnung zur Verfügung. Die Neigungen können daneben bei der Auswahl der Wahlpflichtfächer aus einem Vorlesungskatalog Berücksichtigung finden.

Die Prüfungen finden studienbegleitend zum Semesterende bzw. zum Ende der Blockveranstaltung in der jeweiligen Phase statt. Die Studierenden werden zu diesen Prüfungen nach einem speziell ausgearbeiteten Prüfungsplan geladen.

Bis zum Abschluß des Studiums müssen drei Arbeiten angefertigt werden: Je eine Projekt-, eine Studien- und eine Diplomarbeit. Die drei Arbeiten stellen besonders wichtige Teile der Ausbildung dar. In ihnen sollen Probleme aus den beteiligten Fachgebieten mit wissenschaftlichen Methoden eigenständig unter Anleitung bearbeitet und schriftlich dargestellt werden. Nach dem siebten Semester ist die Diplomarbeit vorgesehen, die Bearbeitungszeit beträgt 3 Monate für theoretische und planerische Problemstellungen und 4 Monate bei experimentiellen Themen. Die Diplomprüfung zum Ende des achten Semesters bestehend aus den Fachprüfungen, den Studienarbeiten und der Diplomarbeit bildet den ersten berufsqualifizierenden Abschluss des Studiums.

Eine intensive Betreuung der Programmteilnehmer ist durch Tutoren und Mentoren gewährleistet, die sowohl beratend und unterstützend tätig werden.



**Bild 2:** Ablaufplan für das Intensivstudienprogramm Maschinenbau

	Vorphase	1.Semester	1.Phase	2.Semester	2.Phase	3.Semester	3.Phase	4.Semester	4.Phase	5.Semester	5.Phase	6.Semester	6.Phase	7.Semester
1	Vorkurse	W0110	S 8124 Ing. Mathe I 4V+2Ü Fertigung I 2V/Ü	S 0120	Industrie- praktikum vor dem Vordiplom 8 Wochen	W 0125/6	W 8850	S 8007	Industrie- praktikum vor/nach dem Vordiplom 8 Wochen	W 8014	Industrie- praktikum vor dem H.-Diplom 6 Wochen	WPF	Industrie- praktikum vor dem H.-Diplom 6 Wochen	W 8108
2		Ing.		Ing.		Ing.	E-Prak. I	Ström. I		Schwing.		6V/Ü		Rech. Prod.
3		Mathe I		Mathe II		Mathe III	1 P	2V+1Ü		2V+1Ü		z.B.		2V+1Ü
4		4V+2Ü		4V+2Ü		2V+2Ü	S 8104 KE-Getr.	S 8104		W 8905		S 8803		W 8301
5				S 0121		W 8002		KE III		Meßtech. I		S 8401		Betriebsf.
6						TM II		2V+3Ü		2V+1Ü				2V+1Ü
7		W8300	W/S 0000	S 8730		3V+2Ü				W 8212		S 9003		W 8122
8		Bauteilpr.	Einf.	Datenv. II			Nichttech. Fach II			Ener.wandl.		Sozialk. II		Produk.t
9		2 V +1P	Program.	2V + 1Ü				S 8006		2V+1Ü				2V+1Ü
10		W2101	2 Ü	S 8001				TM III		W 8359				Schwer- pkt II
11		Physik	W 8565	TMI		W 8103		2V+1Ü		Grundpr.		Schwer- pkt II		Schwer- pkt II
12		3V+1Ü	Thermo P	3V+2Ü		KE II		S 8801		4 P		6V/Ü		3V/Ü
13		W2102				4V+2Ü	Schwer- pkt. I 6V/Ü	E-Tech. II		Schwer- pkt I				
14		W3003	W 9003	S 8103				2V+1Ü		3V/Ü				
15		Chemie	Sozial-	KE I				E-Prak. II						
16		3V	Komp. I	2V+1Ü		W 8800		S 8318				Fach- praktikum		
17		W 7300	2V/Ü	S 2105		E-Tech. I		Materialf.				6P		
18		Werkstoffk		Physik		2V+1Ü		2V+1Ü						
19		Werkst. P.				W 8105		S 8904		1. Studien- arbeit				
20		W7350		3V+1Ü		KL I		Regelt. I		9 SWS		S 8371		
21		W8121	W 8101	S 2106		2V+1Ü		2V+1Ü				Seminar		
22		Datenv.	TZ/CAD			W 7002		WPF:				2. Studien- arbeit		
23		W8731	3 Ü	Thermo II		Werkst.		S 8202				3 SWS		
24		BWL I				2V+1P		2V+1Ü						
25		W6600				Nicht. F I								
26		W8500				2V/Ü								
		Thermo I		S 6603										
		2V+1Ü		BWL II										

Lehrveranstaltungen vorgezogen      Industriepraktika      zusätzliches Lehrangebot

Bild 3: Modellstudienplan für die Fachrichtung Konstruktion, Fertigung und Betrieb

	Vorphase	1.Semester	1.Phase	2.Semester	2.Phase	3.Semester	3.Phase	4.Semester	4.Phase	5.Semester	5.Phase	6.Semester	6.Phase	7.Semester
1	Vorkurse	W0110	S 8124 Ing. Mathe I 4V+2Ü Fertigung I 2V/Ü	S 0120	Industrie- praktikum vor dem Vordiplom 8 Wochen	W 0125/6	W 8850	S 8007	Industrie- praktikum vor/nach dem Vordiplom 8 Wochen	W 8735	Industrie- praktikum vor dem H.-Diplom 6 Wochen	WPF	Industrie- praktikum vor dem H.-Diplom 6 Wochen	W 8812
2		Ing.		Ing.		Ing.	E-Prak. I	Ström. I		Steuer/Info		3V/Ü		Elekt. Ene.
3		Mathe I		Mathe II		Mathe III	1 P	2V+1Ü		2V+1Ü		S 0130		2V+1Ü
4		4V+2Ü		4V+2Ü		2V+2Ü	S 8104 *	S 8104		W 8901		S 8803		Schwer- pkt II
5				S 0121		W 8002		KE III		Tech. El. I		El. Ener. t.		6V/Ü
6						TM II		2V+3Ü		2V+1Ü		2V+1Ü		
7		W8300	W/S 0000	S 8730		3V+2Ü	Nichttech. Fach II			W 8905		S 8732		
8		Bauteilpr.	Einf.	Datenv. II						Meßtech. I		Software		
9		2 V +1P	Program.	2V + 1Ü				S 8006		2V+1Ü		2V+1Ü		
10		W2101	2 Ü	S 8001				TM III		W 8359		S 9003		
11		Physik	W 8565	TMI		W 8103		2V+1Ü		Grundpr.		Sozialk. II		
12		3V+1Ü	Thermo P	3V+2Ü		KE II	Schwer- pkt. I 6V/Ü	E-Tech. II		4 P		Schwer- pkt II		
13		W2102				4V+2Ü		2V+1Ü		Schwer- pkt I		3V/Ü		
14		W3003	W 9003	S 8103				E-Prak. II		3V/Ü				
15		Chemie	Sozial-	KE I				S 8851						
16		3V	Komp. I	2V+1Ü		W 8800		WPF				Fach- praktikum		
17		W 7300	2V/Ü	S 2105		E-Tech. I		S 8401				6P		
18		Werkstoffk		Physik		2V+1Ü		3V/Ü						
19		Werkst. P.				W 8907		S 8904		1. Studien- arbeit				
20		W7350		3V+1Ü		Nachr. t.		Regelt. I		9 SWS		S 8371		
21		W8121	W 8101	S 2106		2V+1Ü		2V+1Ü				Seminar		
22		Datenv.	TZ/CAD			WPF		S 8908				2. Studien- arbeit		
23		W8731	3 Ü	Thermo II		W 8301		Signalü.				3 SWS		
24		W8500				3V/Ü		2V+1Ü						
25		Thermo I												
26		2V+1Ü		BWL II		2V/Ü								

Lehrveranstaltungen vorgezogen      Industriepraktika      zusätzliches Lehrangebot

Bild 4: Modellstudienplan für die Fachrichtung Elektrotechnik und Systemautomatisierung

Die Studierenden erhalten eine solide Sprachausbildung. Ein dreimonatiger Auslandsaufenthalt an einer ausländischen Hochschule ist obligatorisch. Die TU Clausthal ist von jeher international ausgerichtet. 16 Prozent ihrer Studierenden kommen aus dem europäischen und asiatischen Ausland. In über sechzig Hochschulpartnerschaften in Europa, den USA und Asien pflegt die TU Clausthal den internationalen wissenschaftlichen Austausch in Forschung und Lehre. Von diesem Netzwerk profitieren Studierende bei der Auswahl ihres Auslandsaufenthaltes.

Voraussetzung zur Aufnahme in das Studienprogramm ist die Hochschulreife. Studienbeginn ist ausschließlich zum Wintersemester möglich.

Zur Unterstützung des Studiums stehen neben dem BAFöG-Programm für das Intensivstudienprogramm eine Reihe von Stipendien zur Verfügung, die an die Erreichung des Studienfortschrittes gebunden sind. Der Verein der Freunde der TU Clausthal wird die Vergabe der Stipendien übernehmen. Nach Abschluß des ersten Semesters wird geprüft werden, welche Studierenden einen ausreichenden Studienfortschritt erkennen lassen. Diese Teilnehmer erhalten rückwirkend zum 1. Januar ein Stipendium für die Dauer von 6 Monaten, zu dem Zeitpunkt wird erneut der Studienfortschritt kontrolliert und die Stipendien neu zugewiesen.

Verschiedene Industrieunternehmen und Verbände unterstützen durch Bereitstellung von finanziellen Mitteln oder die Bereitschaft Praktikanten zu den festgelegten Terminen aufzunehmen diese Initiative. Das Land Niedersachsen, vertreten durch das Ministerium für Wissenschaft und Kultur, und die TU Clausthal haben gemeinsam dieses Studienprogrammes ins Leben gerufen. Die Unterstützung der Studierenden durch ein Stipendium ist ein Kernpunkt dieses Modells zur Verkürzung der Ausbildungszeit. Die Industrie kann diese Initiative durch ihre kooperative Zusammenarbeit unterstützen und zu einem Erfolg werden lassen. Anfragen zum Programm werden unter „mb-intensiv@tu-clausthal.de“ bearbeitet.

#### **4 Zusammenfassung**

An der TU Clausthal ist durch Anregung des Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur und durch Unterstützung namhafter Industrieunternehmen und Verbänden ein Modellversuch gestartet, der es ermöglicht, den Abschluß eines Diplomstudiengangs Maschinenbau nach vier

Studienjahren zu gewährleisten. Durch ein optimal betreutes, kompaktes Vorlesungs- und Tutorienprogramm ist ein hochkonzentriertes Studium unter Einbindung der vorlesungsfreien Zeit entstanden, in dem keinerlei Abstriche im Lehrumfang vorliegen.

## 3D-CAD-Praktikum mit Pro/ENGINEER<sup>®</sup>

Tawil, M.

*Für Studenten des Maschinenbaus und der Verfahrenstechnik im Hauptstudium wird am Institut für Maschinenwesen (IMW) seit 1995 ein 3D-CAD-Praktikum auf dem CAD-System Pro/ENGINEER<sup>®</sup> angeboten. In diesem Artikel werden die Inhalte dieses Praktikums erläutert.*

*For students of mechanical engineering and process engineering in the advanced degree there is an offer of a 3D-CAD practical training since 1995 on the CAD-system Pro/ENGINEER<sup>®</sup> in the Institute für Maschinenwesen (IMW). In this article the contents of this traineeship will be explained.*

### 1 Einleitung

Um dem Stand der Technik auf dem Gebiet der rechnerintegrierten Produktentwicklung zu entsprechen wird am Institut für Maschinenwesen eine ganze Reihe aktueller CAD-Systemen angeboten, die ein breites Band an Anwendungen abdecken. Diese Systeme sind nicht nur hilfreiche Werkzeuge zur Bearbeitung von Industrie- und Forschungsprojekten, sondern werden auch stark in der Lehre eingebunden. So wird im Grundstudium 2D-CAD und im Hauptstudium 3D-CAD gelehrt. Außerdem können die Studenten bei der Anfertigung von konstruktiven bzw. experimentellen Studien- und Diplomarbeiten auf dem langjährigen Know How des Institutes auf dem Gebiet der CAD zurückgreifen.

### 2 Ziel des Praktikums

Den Studenten im Grundstudium steht ein 2D-CAD-System zur Verfügung, mit dem Sie technische Zeichnungen als Verständigungsmittel und gemeinsame Sprache der Ingenieure erstellen können. In vielen Fällen wünscht sich der Ingenieur jedoch ein 3D-Modell als Grundlage seiner Arbeit, z.B. in der Architektur, im Anlagenbau, für FE-Berechnungen, bei der Simulation von Fertigungsprozessen etc. Ausgehend von den dreidimensionalen Modellen können Baugruppen, Einzelteil- und Zusammenbauzeichnungen erstellt werden, wobei der Assoziativität der Objekte Sorge getragen wird. Insbesondere in der Konstruktion neuer Produkte und im Bereich Produktdesign ist die 3D-CAD-Technik ein unverzichtbares Werkzeug.

Das Ziel des Praktikums ist daher, den Studenten des Hauptstudiums ein solches Werkzeug an die Hand zu geben, mit dem Sie auf den späteren Beruf gut vorbereitet sind.

### 3 Das CAD-System Pro/ENGINEER<sup>®</sup>

Das Programm Pro/ENGINEER<sup>®</sup> der Firma Parametric Technology Corporation (PTC) ist ein umfangreiches 3D-CAD-System und eignet sich insbesondere für Anwendungen des klassischen Maschinenbaus. Pro/ENGINEER<sup>®</sup> verwendet 3D-Volumenmodelle, wodurch jeder Raumpunkt beschreib- und ansprechbar ist und eine vollständige grafische Darstellung möglich wird. Körper werden vornehmlich flächenorientiert generiert, d. h. eine 2D-Darstellung erhält z. B. eine Tiefenstreckung oder wird um eine Achse rotiert. Es stehen aber auch direkte Manipulationen, wie Verrundung von Kanten, Erzeugung von Bohrungen und Verknüpfung von Körpern zur Verfügung. Der Umgang mit 3D-Modellen unterscheidet sich wesentlich vom 2D-Konstruieren, da man die Möglichkeit hat, im Raum zu agieren, wobei man auf bisherige Zeichenregeln verzichten und sich neue Sicht- und Denkweisen aneignen muß, um korrekt und effektiv zu arbeiten. Das wichtigste Merkmal von Pro/ENGINEER<sup>®</sup> ist die vollständige Parametrisierung der Modelle, durch welche die Durchgängigkeit des Systems ermöglicht wird. Dabei greifen die verschiedenen Programm-Module auf das gleiche Modell zu. Somit können die an einem Modell einmal durchgeführten Änderungen in alle anderen Programm-Module automatisch übernommen werden. Dadurch wird die Erstellung von Baugruppen inklusive Stücklisten, technischen Zeichnungen bzw. NC-Abläufen wesentlich vereinfacht und beschleunigt.

### 4 Aufbau des Praktikums

Mit dem Praktikum sollen den Teilnehmern die Grundzüge von Pro/ENGINEER<sup>®</sup> vermitteln werden. Anhand eines speziell auf das Praktikum zugeschnittenen Manuskripts sollen die Teilnehmer eine vorgegebene Konstruktion fertigstellen. Das Manuskript befindet sich auf der Instituts-Webseite



und ist via Internet weltweit abrufbar. Dazu sind im Wintersemester wöchentlich vier Stunden eingerichtet, wo die Studenten umfassend betreut werden. Das Praktikum ist in mehreren Abschnitten unterteilt. Für jeden Abschnitt haben die Teilnehmer eine bestimmte Bearbeitungszeit, nach deren Ablauf die Arbeitsergebnisse von den Betreuern kontrolliert werden. Erst danach kann mit dem nächsten Schritt begonnen werden. Dadurch wird ein erfolgreicher Abschluß des Praktikums mit einem hohen Lerneffekt erreicht und das Einhalten von Terminplänen trainiert.

#### 4.1 Die Übungen

Nach einer kurzen Einführung in die Systemumgebung müssen die Teilnehmer einige Übungen bearbeiten, die die grundlegenden Funktionen von Pro/ENGINEER® behandeln. Zu der jeweiligen Übung bekommen die Studenten eine technische Zeichnung und müssen das entsprechende 3D-Modell erstellen. Mit den Übungen sollen Sie auf die eigentliche Aufgabe des Praktikums vorbereitet werden.

#### 4.2 Einführung in Pro/PDM<sup>®</sup>

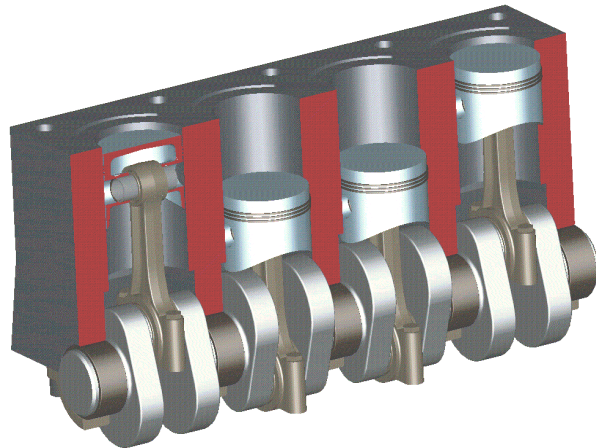
Pro/PDM (Parametric Design Manager) ist ein eigenständiges Produktdatenmanagement-System der Firma PTC. Es ermöglicht die Datenverwaltung vom Konzept bis zur Produktion. Pro/PDM<sup>®</sup> erlaubt es, sowohl einfache Abhängigkeiten zwischen allen Daten eines bestimmten Produktes zu erstellen (z. B. Stückliste X gehört zu Modell Y), als auch eine Kontrolle über diese Daten und ihren Zugriff zu errichten. Unter Pro/PDM<sup>®</sup> wird festgelegt, welche Personen auf die Dateien eines Produktes in den unterschiedlichen Entwicklungsstufen Zugriff haben bzw. diese bearbeiten dürfen.

Die Studenten erhalten eine kurze Einführung in Pro/PDM<sup>®</sup> um zum einen Teile aus der Institutseigenen Datenbank zu holen und in ihrer Konstruktion zu integrieren. Zum anderen sollen die fertig bearbeiteten Aufgaben in eine von den jeweiligen Teilnehmern eingerichtete Datenbank gespeichert bzw. verwaltet werden.

#### 4.3 Die Aufgabe

Die Teilnehmer werden durch schrittweises Abarbeiten der Übungen in die Lage versetzt die gestellte Praktikumsaufgabe, einen Verbrennungsmotor (**Bild 1**), mit Pro/ENGINEER<sup>®</sup> zu erstellen.

Die Aufgabe ist in mehreren Teilaufgaben, die durch entsprechende Übungen vorbereitet werden, unterteilt. Die einzelnen Bauteile des Verbrennungsmotors (Kolben, Motorblock etc.) werden nach vorgegebenen technischen Zeichnungen modelliert. Die erzeugten Modelle werden mit einigen vorgefertigten Teilen wie Normteilen zur Gesamtbaugruppe (Verbrennungsmotor) zusammengebaut.



**Bild 1:** Praktikumsaufgabe: Verbrennungsmotor

Die Verknüpfungs-Bedingungen der einzelnen Motorkomponenten sollen so festgelegt werden, daß eine Kinematiksimulation möglich ist. Die Studenten lernen dadurch das Festlegen von Beziehungen unter Pro/ENGINEER<sup>®</sup> sowie die Durchführung von Kollisionskontrollen für komplexe Baugruppen. Abschließend soll eine technische Zusammenbauzeichnung mit der dazugehörigen Stückliste erstellt werden. Die Aufgaben werden dann auf Vollständigkeit und der Verbrennungsmotor wird auf Funktionsfähigkeit geprüft. Am Ende des Praktikums wird ein Test (dauert 30 Minuten) durchgeführt, der theoretische Verständnisfragen zum 3D-CAD-Umfeld beinhaltet.

### 5 Zusammenfassung

Die CAD-Lehre am IMW bietet den Studenten sehr gute Möglichkeiten, zukunftsorientierte Kenntnisse für Studium und spätere Berufspraxis auf diesem Gebiet zu erwerben. Fast alle Industriezweige setzen CAD-Kenntnisse in ihren Anforderungsprofilen voraus. Die Verwendung von mehreren voneinander unabhängigen CAD-Systemen als Einzellösungen für die unterschiedlichen Aufgabenstellungen in einem zukunftsorientierten Industriebetrieb gehört schon heute der Vergangenheit an. Bereits heute existieren 3D-CAD-Lösungen, deren effizienter Einsatz die schon lange angestrebte rechnerintegrierte Produktentwicklung ermöglicht.

## Über einen Praktikumsaufenthalt zweier Auszubildender des Lehrberufes Fachinformatiker/Anwendungsentwickler

Düsing, C.

*Seit geraumer Zeit ist die Ausbildungsoffensive der Bundesregierung im Bereich Informationstechnologie in aller Munde. Neue Ausbildungsberufe wurden geschaffen, um dem seit einigen Jahren existierenden und immer noch stark anhaltenden Fachkräftemangel in diesem Bereich Herr zu werden. So verschlug es auch zwei Auszubildende der Fachrichtung Fachinformatiker/Anwendungsentwickler zu einem sechsmonatigen Praktikum an das Institut für Maschinenwesen. Über deren Aufenthalt am Institut und ihre Aufgaben soll hier kurz berichtet werden.*

*The German government started an educational offensive in the domain of information technologies some years ago in order to manage the continuing demand of the industry for professionals in this area. This way lead two apprentices of the computer science / application developer course to the department for mechanical engineering of the University of Clausthal for a six-monthly practical training. This article briefly describes their stay and their tasks at the department.*

### 1 Einleitung

Von der steigenden Nachfrage der Industrie nach gut ausgebildetem Fachpersonal im Bereich der Informationstechnologien zunehmend unter Druck gesetzt, rief die Bundesregierung vor ca. 2 ½ Jahren eine Ausbildungsoffensive in diesem Bereich aus. Hieraus ergaben sich neue Ausbildungsberufe, deren Absolventen den zukünftig immer größer werdenden Bedarf an Fachkräften decken sollten. Berufe, die hieraus resultierten, waren vor allen Dingen der des Informatikkaufmanns sowie des Fachinformatikers, welcher sich noch in Systemintegration und Anwendungsentwicklung aufteilen lässt. Die Ausbildung dauert in der Regel zwei Jahre. Das während dieser Zeit angeeignete Wissen wird in einer Abschlußprüfung der zuständigen IHK (Industrie- und Handelskammer) abgefragt. Wesentlicher Bestandteil der Ausbildung zum Fachinformatiker ist ein sechsmonatiges Praktikum, welches die Auszubildenden im letzten Drittel ihrer Ausbildung in der Industrie durchführen müssen. Den Abschluß des Praktikums bildet eine so ge-

nannte Projektaufgabe, bei der die Praktikanten innerhalb von zwei Wochen das Erlernte selbständig anwenden sollen.

Im Zeitraum von Mai bis Oktober 2000 wirkten am Institut für Maschinenwesen zwei Praktikanten des Ausbildungsberufes Fachinformatiker / Anwendungsentwickler, deren Werdegang und Projektarbeiten im Nachfolgenden beschrieben werden sollen.

Die beiden Praktikanten Christian Friedrich und Johannes Lucas (siehe **Bild 1**) nehmen im Rahmen einer Weiterbildung an der Ausbildung zum Anwendungsentwickler teil. Beide haben bereits eine Ausbildung im kaufmännischen bzw. handwerklichen Bereich abgeschlossen und sind nun bestrebt, auch ihr Können im informationstechnologischen Sektor unter Beweis zu stellen, um sich darauf eine neue Grundlage für ihr zukünftiges Berufsleben zu schaffen.

Zu Beginn des Praktikums wurde zunächst eine Einführung in die Welt des 2D- und 3D CAD (Computer Aided Design) mit dem Programm Solid-Works™ gegeben. Dies wurde mit der Absicht durchgeführt, beide mit den Grundzügen der Softwareergonomie vertraut zu machen und sie die Anforderungen eines Benutzers an ein Stück Software am eigenen Leib erfahren zu lassen. So konnten sie lernen und selber einschätzen, was es bedeutet, benutzerfreundliche, selbsterklärende und intuitiv zu bedienende Software zu entwickeln. Erst durch die selbstgemachte Erfahrung lernt der Anwendungsentwickler, Fehler in der Übersichtlichkeit von grafischen Benutzeroberflächen oder vermeintliche intuitive Bedienung zu vermeiden, denn was dem Programmierer nur allzu deutlich vor seinem inneren Auge vorschwebt stimmt in der Regel nicht mit den Vorstellungen des Endanwenders überein.

Der nächste Schritt war für beide ein Sprung ins kalte Wasser, sie sollten zum ersten Mal selbständig eine Programmieraufgabe übernehmen und sich gleichzeitig in eine neue Programmiersprache einarbeiten. Die Aufgabe war es, einen Dateibrowser (ähnlich eines filemanager unter UNIX oder dem Explorer unter einer Windowsoberfläche) zu

entwickeln, der zusätzliche Funktionen im Bereich des Versionsmanagement zur Verfügung stellt. Die Entwicklung sollte mit der Skriptsprache Tcl/Tk durchgeführt werden, welche am Institut häufig verwendet wird, da sie neben Vorteilen wie leichter Erlernbarkeit und der Möglichkeit der schnellen Erstellung von Benutzeroberflächen auch die Möglichkeit bietet, die Software auf unterschiedliche Betriebssysteme zu portieren, d.h. das sie im weitesten Sinne plattformunabhängig ist. Als Ergebnis dieser Praktikumsphase kann festgehalten werden, daß beide in der Lage sind, sich in neue Programmiersprachen einzuarbeiten und diese zweckgebunden einzusetzen. Der übermäßig hohe Betreuungsaufwand und ausführliche Gespräche insbesondere zu Beginn dieses Praktikumsabschnittes lassen darauf schließen, daß eine solche Art des Erlernens von umfassenden Arbeitsaufgaben, mit denen ein Anwendungsentwickler im späteren Berufsleben in jedem Fall konfrontiert wird, viel früher im eigentlichen Ausbildungsbetrieb hätte erfolgen sollen.



**Bild 1:** Die beiden Praktikanten Christian Friedrich und Johannes Lucas

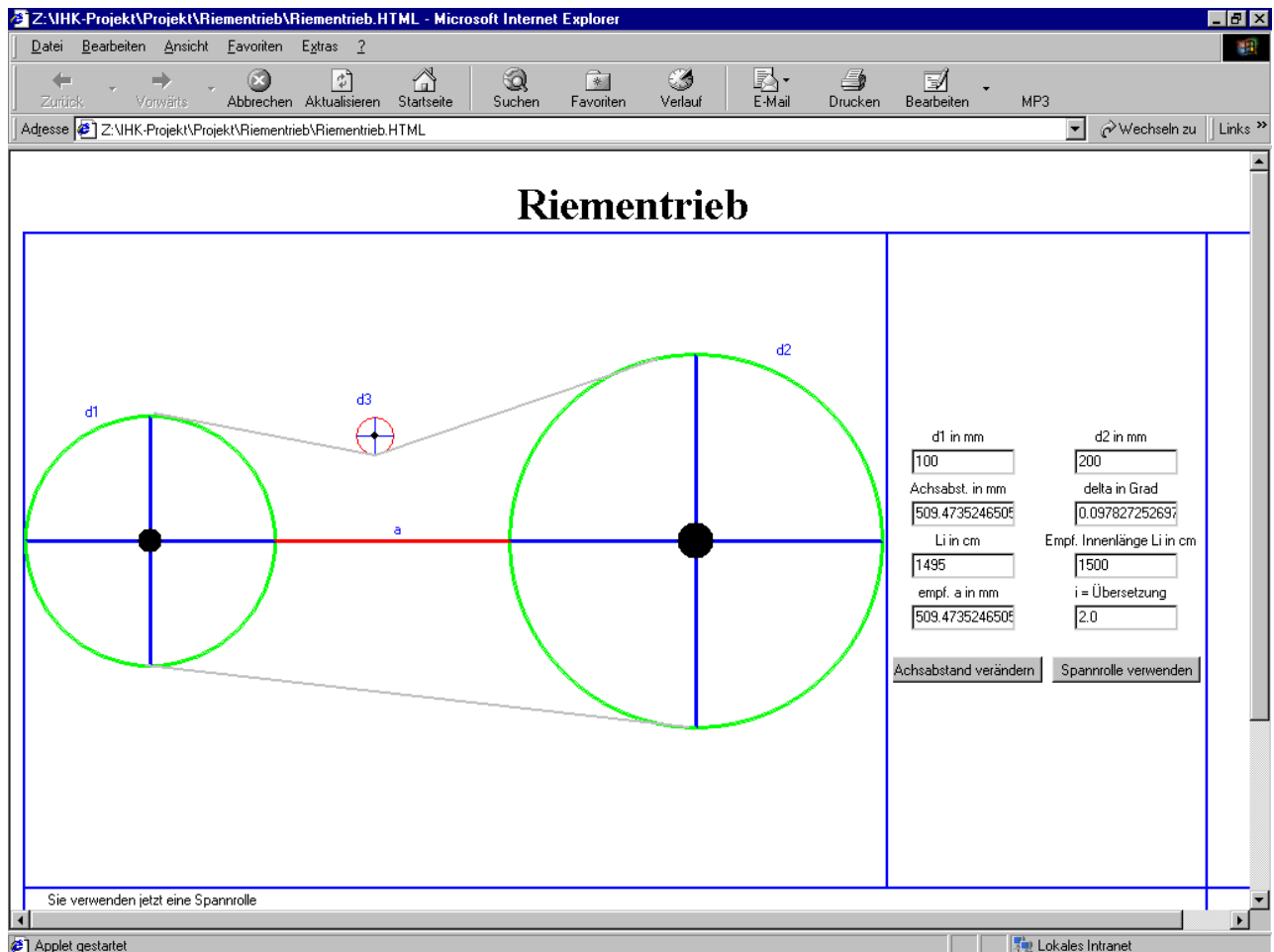
Auf die abschließende Projektarbeit, die jeweils beide in einem Zeitraum von zwei Wochen durchzuführen hatten soll in den folgenden Abschnitten näher eingegangen werden. Diese Projektarbeiten stellen einen wesentlichen Teil der Ausbildung sowie der zu erbringenden Prüfungsleistung dar. Die Auswahl der Themen sowie der zu verwendenden Programmiersprachen / Entwicklungsumgebungen für diese Projekte stellte für die Betreuer eine relativ schwierige Aufgabe dar. Eine konkrete Entwicklungsaufgabe, die innerhalb von zwei Wochen durchzuführen ist, inklusive kompletter ausführlicher Dokumentation, ist nicht gerade einfach zu formulieren, wenn man auch dem Anspruch gerecht

werden will, den Großteil der Ausbildungs- und Lehrinhalte darin wiederzufinden. Weiterhin war es ein großes Anliegen, eine Programmiersprache für die Entwicklung zu verwenden, die dem heutigen Stand der Technik entspricht. Dies war jedoch erst nach eingehenden Diskussionen mit dem ausbildenden Betrieb sowie der zuständigen IHK möglich, da es sich bei den bis dahin für die Projektarbeiten zugelassenen Programmiersprachen meines Erachtens um solche handelt, bei denen sich Leute meiner Generation zum Teil glücklich schätzen können, überhaupt noch einmal von diesen gehört zu haben. Gerade im sich rasant entwickelnden Bereich der Informationstechnologie sollten sich die ausbildenden Betriebe sowie auch die zuständigen Industrie- und Handelskammern ständig auf dem neuesten Stand befinden. Dies ist eine absolute Notwendigkeit, um die Auszubildenden wirklich industrienah ausbilden zu können. Das bedeutet, das der Lehrgang sich ständig kontinuierlich den Veränderungen im Systemumfeld und den Anforderungen der Industrie ändern muß, was zur Zeit leider noch nicht der Fall ist. Eine solche Ausbildungsstrategie und -methodik, wie sie zum Beispiel an den Universitäten gang und gäbe ist, ist somit absolut erstrebenswert und notwendig. Beide Projektarbeiten konnten aber schlußendlich mit der Programmiersprache Java durchgeführt werden, welche momentan als „state of the art“ im Bereich der objektorientierten Programmiersprachen angesehen werden kann.

## 2 Auslegung eines Riementriebes als Modul in der multimedialen Lehre am IMW

Die Lehre am Institut für Maschinenwesen soll durch die Unterstützung multimedialer Methoden bereichert werden. Ein Modul dieser multimedialen Unterstützung soll in diesem Fall ein Programm zur Auslegung eines Riementriebes sein. Es sei darauf hingewiesen, daß eine solche Software keinesfalls die Lehre ersetzen kann, sondern nur unterstützend wirken. Die Aufgabe des Praktikanten Christian Friedrich war es, eine Anwendung zu erstellen, mit denen Studenten des Studienganges Maschinenbau die Auslegung eines Riementriebes nachvollziehen können. Die Software soll auf den Erkenntnissen aus der Vorlesung aufbauen und die Inhalte vorlesungsbegleitend vertiefen.

Diesbezüglich wurde am Beginn der Projektarbeit ein ausführliches Gespräch mit Frau Dipl.-Ing. Wächter durchgeführt, die für die Koordination eines Großteils der Lehre am IMW zuständig ist.



**Bild 2:** Screenshot des Riementriebprogrammes

Frau Wächter stellte in diesem Fall den Kunden dar, der seine Anforderungen, welche die zu entwickelnde Software zu erfüllen hat, dem Anwendungsentwickler mitteilt. Wesentliche Anforderungen, die aus diesem Gespräch abgeleitet wurden, waren wie folgt:

- Das Programm soll plattformunabhängig sein, d.h. von jedem Studenten auch auf seinem Rechner zu Hause ausgeführt werden können.
- Die Wirkungsweise und Funktionsweise des Riementriebes soll grafisch verdeutlicht werden.
- Bei der Auslegung der Riemenlänge soll auf eine vorgegebene Datenbasis empfohlener Riemenlängen zurückgegriffen werden können.
- Die Anwendung soll intuitiv zu bedienen sein und die Vorlesungsinhalte in diesem Bereich verdeutlichen.

Dies stellt nur eine Auswahl der Anforderungen dar, die während des Gespräches ermittelt werden konnten, verdeutlichen aber durchaus beispielsweise die typische Art von Anforderungen wie sie bei der Erstellung von Software - Anwendungen üblich sind.

Im Anschluß daran wurde zunächst im Detail darauf eingegangen, wie diese Anforderungen zu erfüllen sind. Als Beispiel hierzu könnte man nennen, daß die Plattformunabhängigkeit dadurch realisiert wurde, daß ein Applet in Java entwickelt wurde. Dadurch kann die Anwendung problemlos in Webseiten eingebunden werden und somit jedem Studenten, der (wie in Clausthal üblich) über einen Internetzugang verfügt, zur Verfügung gestellt werden.

Auf weitere Beschreibungen detaillierter Arbeitsschritte, wie die Erstellung des Layouts oder die Umsetzung der physikalischen Formalismen in Quellcode soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, vielmehr wird im Folgenden die Funktionsweise des fertiggestellten Programms beschrieben.

In der linken Seite des Applets (siehe **Bild 2**) ist eine Grafik eines Modells eines Riementriebes zu sehen. Im rechten Rahmen befinden sich Eingabefelder für die bei der Auslegung eines Riementriebes benötigten wichtigen Parameter. Nach Eingabe der Durchmesser der Riemenscheibe, bzw. eines Durchmessers und der gewünschten Übersetzung wird der jeweils fehlende Parameter ermittelt und ausgegeben. Aus einer der Standardliteratur entnommenen Tabelle für empfohlene Rie-





## Ist der Computer ein Oberharzer?

Dietz, P.

*(Auszug aus der sogenannten Schärperrede zum 19.11.1999, bei der die Binding-Brauerei Oberharzer Bürger zum Anstich des CAROLUS-Bockbiers eingeladen hat. Die hier verkündeten Thesen halten wissenschaftlichen Nachprüfungen nicht so stand wie hoffentlich die restlichen Beiträge der Institutsmitteilungen.*

*Der abgedruckte Beitrag enthält nur den wissenschaftlichen Kern der Rede, lokal- und regionalpolitische Ausflüge werden hier nicht wiedergegeben.)*

Also, über was kann schon so ein einfacher Hochschullehrer reden? Er kann Vorlesungen halten, kann Ihnen etwas von den Errungenschaften der Wissenschaft erzählen, er kann Ihnen von berühmten Wissenschaftlern berichten und da haben wir in Clausthal eine Menge anzubieten.

Ich möchte damit auch der Beschreibung der Oberharzer entgegenreten, wie sie beispielsweise in einem Lexikon des letzten Jahrhunderts zu finden ist: „Die Harzer sind ein kleines, runzliges, diebisches Bergvolk ...“

Etwas besser kommen wir ja schon weg bei der Beschreibung des Herrn von Heß 1793. Da heißt es unter anderem: „Die Menschengattung dieser Gegend ist von mittlerer Größe, eher gut als schlecht gebaut. Etwas Verunstaltetes haben die kurzen Schenkel und Beine, sowie die durchgängig vorwärts gebogenen Knie, eine Folge des Klettern auf den Gebirgen von zarter Jugend an.“ ...und weiter: „Unter den Weibern gibt es nicht selten schlanke, wohlhüstig geformte, sehr busenreiche Figuren“.

Aber wir wollten ja von herausragenden Figuren der Geschichte reden, anzubieten haben wir im Oberharz beispielsweise

Georg Friedrich Telemann

Robert Koch

Gottfried Wilhelm Leibnitz

Arnold Sommerfeld

Es ist natürlich nicht so, daß Goslar da nichts anzubieten hätte. Denken Sie beispielsweise an Albert Niemann, den Erfinder des Kokains. Ich gebe auch gern zu, daß die Familie Siemens wirtschaftlich erfolgreicher war als Robert Koch, aber zahlt

sich das aus? Siemens hat in Goslar keine Fertigungsstätte hinterlassen, aber sehen Sie sich in Clausthal einmal das Robert-Koch-Krankenhaus an.

Es gibt auch eine ganze Reihe von Erfindungen, auf die wir stolz sein können, das Drahtseil, die Fahrkunst oder die Schiene, alles Erfindungen, die Ihnen wohl bekannt sind.

Eine Erfindung ist bisher in der Vergangenheit leider in Vergessenheit geraten, obwohl sie heute unser Leben - und dies nicht nur im Oberharz - weitgehend bestimmt. Eine Erfindung, die für uns Probleme löst, die wir ohne sie gar nicht hätten. Selbst für uns an der TU kommt überraschend erst durch die neuesten Forschungen zutage:

### der Computer ist eine Clausthaler Erfindung.

Ich meine, das Geheimnis, das meine Kollegen so streng hüten, muß endlich ans Tageslicht. Der Computer ist seit alter Zeit eng mit Clausthal verbunden, insbesondere mit der Stadtverwaltung. Das sagt an sich schon die Abkürzung EDV - Ende der Vernunft.

Dies mag an sich schon Beweis genug sein für die Behauptung, daß der Computer sozusagen urharzer Gestein ist. Aber es gibt noch weitere Beweise:

**Bild 1** zeigt in einer historischen Aufnahme den göttlichen Funken, der sich einst über den Urstadtvater von Clausthal ergoß. Offenbar gab es aber auch schon damals Schwierigkeiten bei der Einführung der elektronischen Datenverwaltung in das Stadtgeschehen, so daß der erste Entwurf nicht weiterverfolgt wurde.

Erste Zeugen bietet die folgende authentische Höhlenzeichnung, die unjüngst in der Nähe von Buntenbock gefunden wurde **Bild 2**. Es handelt sich um das erste Institut für Mathematik und Informatik, das sich bereits in damaliger Zeit mit dem Problem eines effizienten Zeitmanagements an Hochschulen befaßte. Leider gerieten die Kollegen über eine sinnvolle Programmierung in einen Streit, wobei sie mit Keulen sowohl die Erfindung selbst als auch die eigenen Schädel eingedonnert haben. Die Dokumente berichten, daß auf diese Weise die



**Bild 1:** Die göttliche Gabe an den Menschen (bei Restaurierungsarbeiten in Rom freigelegt)



**Bild 2:** Das historische Institut für Mathematik und Informatik der Bergurakademie (Höhlenzeichnung im Raum Buntentock)

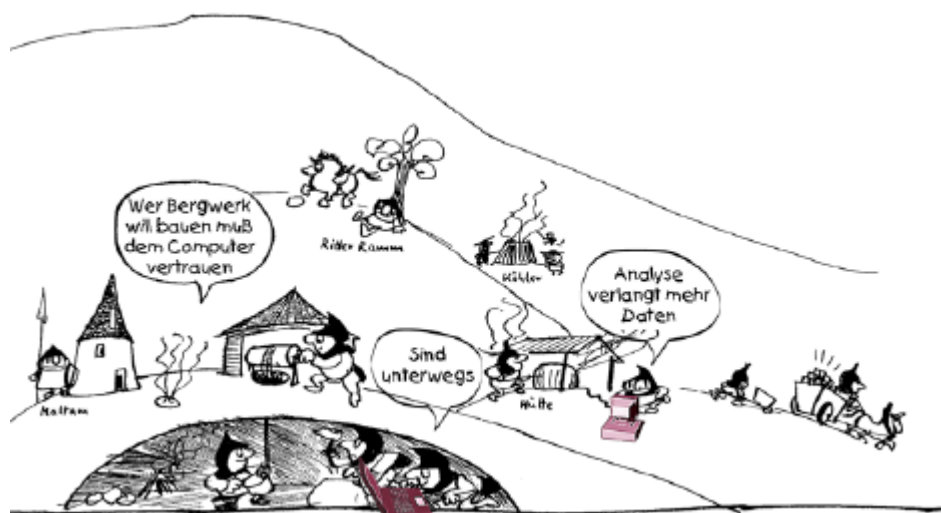
beiden Fachbereiche sich auf Dauer zerstritten haben und eigene Ansiedlungen gründeten, die Frauen wurden bei dieser Gelegenheit endgültig ins Tal vertrieben.

Den wissenschaftlichen Beweis für diese Behauptung können Sie aus den heutigen Zuständen im Oberharz ableiten: noch heute sitzen die Mathematiker in einer Ansiedlung in Clausthal, während die Informatiker ihre Stellung auf den Bergen Zellerfelds ausgebaut haben. Und Sie wissen, wie es unseren Studierenden geht, wenn sie nach Frauen suchen: sie müssen ins Tal.

In diesen frühen Zeiten wurde der Rechner gern im Bergbau eingesetzt. In der historischen Darstellung **Bild 3** wird links die Untertageanwendung gezeigt, bei der mit Hilfe des Programms Excel die Aus-

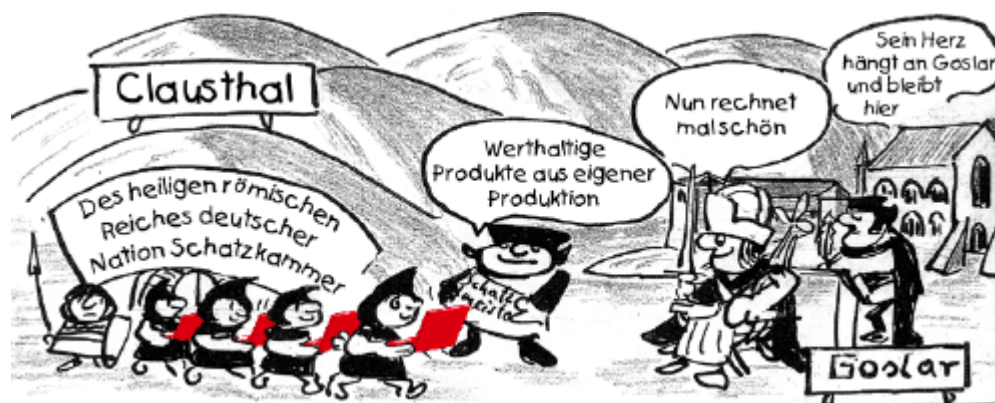
beute einer ganzen Woche durch einen einzigen Fingerdruck gelöscht werden konnte. Diese Anwendung kam mit der Zeit außer Mode, weil die Bergleute in der Dunkelheit immer öfters beim Schärpen statt des Butterbrotes ihren Laptop verspeisten. Dagegen wird die Übertageanwendung in der Hütte heute noch gern vorgenommen. Eine wichtige Anwendung stammt aus dieser Zeit: Die Hüttenleute machten es sich zur Gewohnheit, wenn sie sich über ihr Windows 0.0 ärgerten, den Rechner einfach in die heiße Schmelze zu werfen. Daraus entstand in späteren Jahren die sogenannte Hotline, die aber diesen genialen Gedanken der Problembeseitigung niemals mehr so elegant löste wie unsere alten Oberharzer Hüttenleute.





**Bild 3:** Anwendungen des Computers im Bergbau des Mittelalters (aus: unveröffentlichte Skizzen zu De Re Metallica von Agricola)

Ein weiteres Geheimnis, das durch die Ausgrabung alter Dokumente zutage trat, darf ich Ihnen hier verraten. Der Harz war mit seinen Bodenschätzen schon viel früher ausgebeutet, als dies gemeinhin bekannt ist. Da der Kaiser aber darauf bestand, in Goslar seine Pfalz zu bauen, mußte eine neue Produktion her - sozusagen der Vorläufer der von unserer Kreissparkasse heute noch intensiv beabsichtigten Existenzgründungen. Die Lösung lag, wie **Bild 4** zeigt, in der Produktion von Computern in den leerstehenden Bergwerken. Der Verdienst kam aber, wie sie der historischen Darstellung unschwer entnehmen können, keineswegs den Oberharzern zugute, sondern mußte nach Goslar abgeliefert werden. Bereits aus diesen Tagen stammt also die freundschaftliche Beziehung der beiden Städte, die uns die Politiker immer so herzerreißend schildern.



**Bild 4:** Historische Ausbeute aus dem Rammelsberg (15. Jahrhundert, Privatbesitz)

Die folgende Darstellung aus einem kürzlich eröffneten Goslarer Archiv zeigt einen weiteren Beweis für die hochentwickelte Technik des Oberharzes. Auf **Bild 5** ist ein Oberharzer Computerhändler dargestellt, der nach historischem Vorbild ein Page des römischen Kaisers deutscher Nation war, also ein sogenannter Römpage (Clausthaler Geschäftsmann, die Re-

daktion), der dem damals in Goslar weilenden Kaiser seine Hardware anbietet. Man sieht auch, daß das Gerät noch nicht so ganz ausgereift ist, was damals den Kaiser veranlaßte, den Kauf zurückzuweisen.

Dies ergab die aus der Geschichte hinlänglich bekannten Verwicklungen. Die Fertigung der Hard- und Software lag damals in der Hand der Kirche. Wir sehen in **Bild 6** einen Blick in die Werkstatt: links wird das Betriebshandbuch erstellt, daneben sehen Sie die Entwicklung des ersten Laptops, während die Kollegen auf der rechten Seite sich mit den Schaltplänen und der Montage des Computers befassen. Im Hintergrund der heilige Bill Gates, der die Fabrikation überwacht.

Die Weigerung des Kaisers, die ihm angebotene Hard- und Software zu kaufen und zu bezahlen, führte zu erheblichen Auseinandersetzungen und zu einem außerordentlich getrübbten Hotline-Verhältnis, wie es **Bild 7** von der Schlacht am Welfesholz zeigte. Der Kaiser unterlag, mußte per-

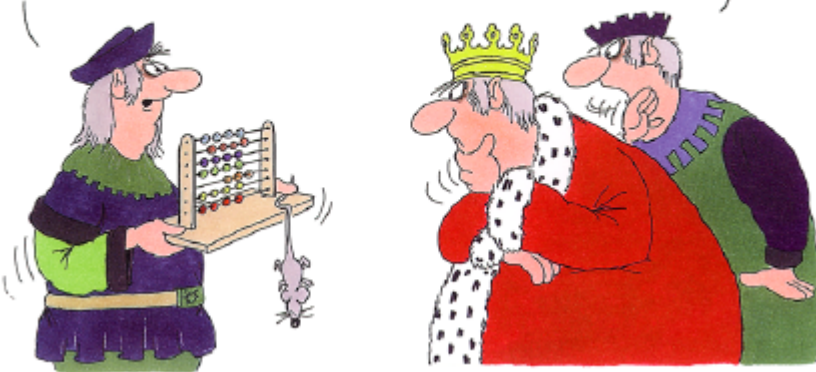
sönlich programmieren lernen und zu Fuß bis nach Canossa gehen, um sich bei Bill Gates persönlich zu entschuldigen (**Bild 8**).

Auf diese Weise begleitete der Computer als Clausthaler Erfindung die Geschichte des Oberharzes. Viele Errungenscha-

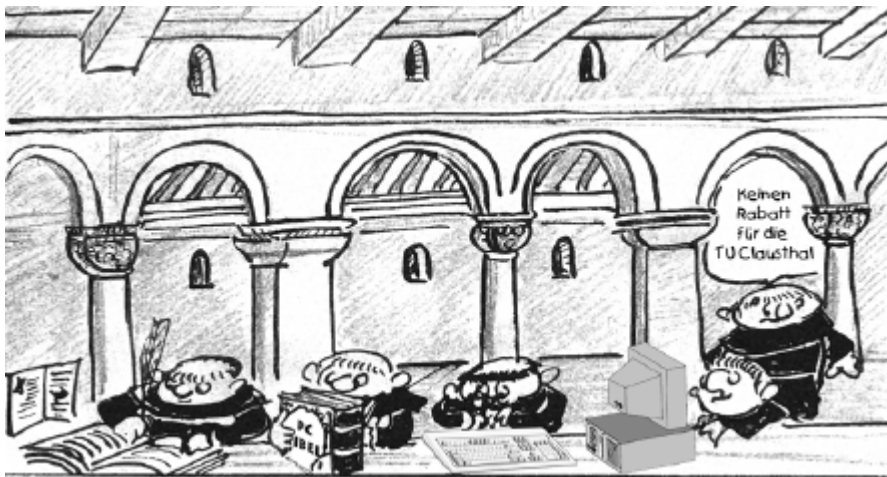
ften der Neuzeit waren ohne diese große Tat nicht möglich:

DIE NEUESTE  
RECHNERGENERATION:  
16 FARBEN, AUF FESTPLATTE  
MONTIERT, INKLUSIVE MAUS ...

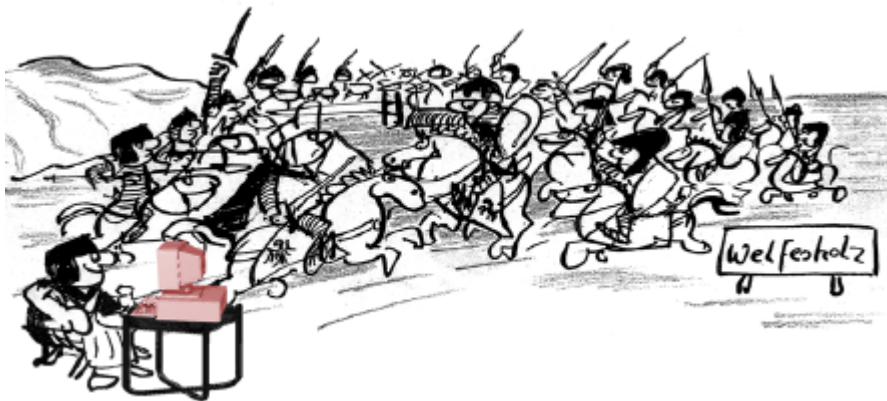
IHR SOLLTET NOCH WARTEN -  
IN SECHS MONATEN KOSTET ER  
NUR NOCH DIE HÄLFTE ...



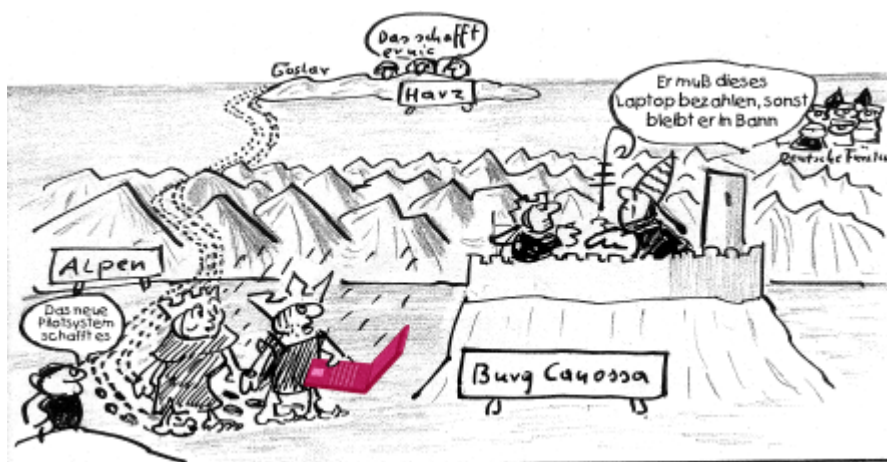
**Bild 5:** Sonderangebot in der historischen Datenverarbeitung (Katalog eines oberharzer Computerhändlers im 15. Jahrhundert)



**Bild 6:** Blick in die Werkhallen der Goslarer Computerproduktion (von der Kirche bisher geheimgehaltenes Dokument des Goslarer Dom-schatzes)



**Bild 7:** Schlacht am Welfesholz (aus: Die wahren Hintergründe zur Entwicklung des heiligen römischen Reichs)

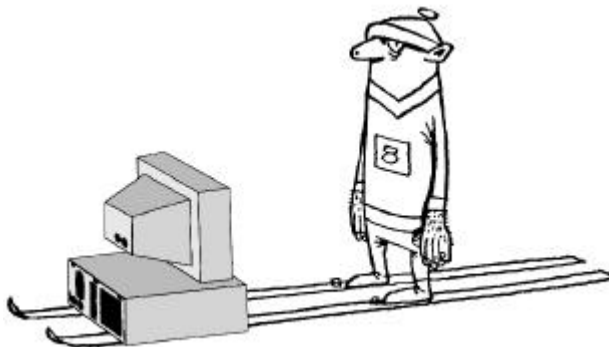


**Bild 8:** Gang zu Canossa (bisher geheimgehaltenes Dokument in den Annalen einer bekannten Sandalenfabrik)



- So entstand der berühmte Clausthale Mitternachtsschrei, als einem Clausthale Studenten durch versehentliche Betätigung einer Taste die gesamte wissenschaftliche Arbeit des letzten Jahres gelöscht wurde.
- Auch der Harzer Hexensabbat ist der erste Zusammenschluß emanzipierter Oberharzer Ehefrauen aus Frust über ihre Ehemänner, die sich im Internet immer nur nackte Weiber angesehen haben statt nach Hause zu kommen.
- Typische Oberharzer Charaktereigenschaften und Vorgehensweisen in der Stadtverwaltung sind auf den Jahrhunderte langen Umgang mit dem Computer zurückzuführen. Glauben Sie, die so wohlorganisierte Bauplanung der Adolf Römerstraße wäre ohne Computer möglich gewesen?

Noch heute ist der gemeine Oberharzer eng mit dem Computer verbunden, sein Leben wird nach wie vor von dieser Erfindung geprägt. Er kann auch in seiner Freizeit nicht auf ihn verzichten, sei es nun im Winter oder im Sommer, wie es die folgenden Bilder (**Bild 9 und 10**) zeigen. Auch das Familienleben im Oberharz wird von Ausdrücken aus der Computersprache geprägt.

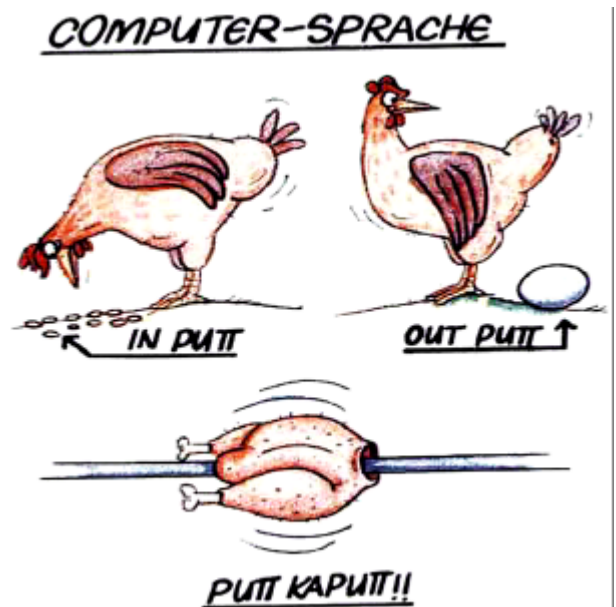


**Bild 9:** Oberharzer Wintersport (private Dokumentation)



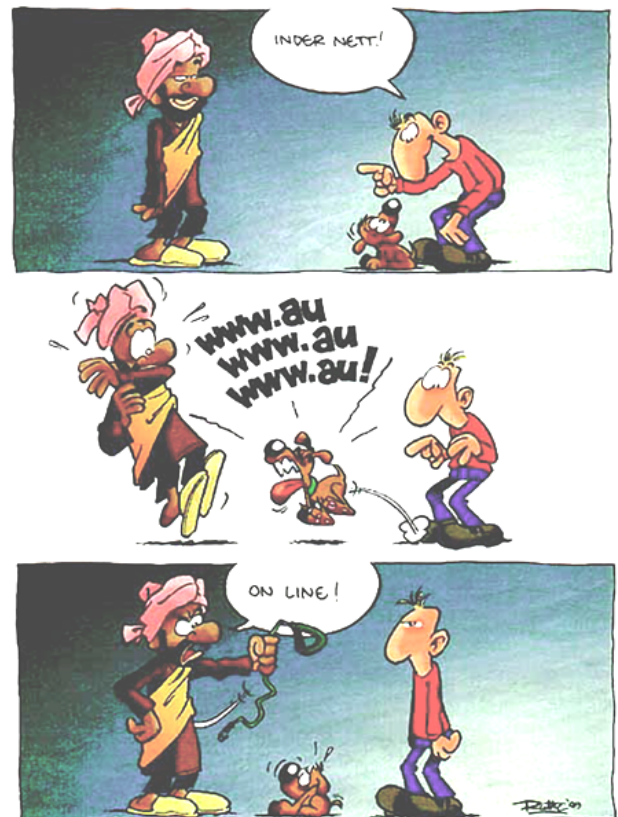
**Bild 10:** Auf der Rennbahn in Bad Harzburg (Portraitsammlung Oberharzer Preisjockeys, Bad Harzburg)

So spricht der moderne Computeranwender von Inputt und Outputts, die vor 400 Jahren noch völlig anders verstanden wurden (**Bild 11**).

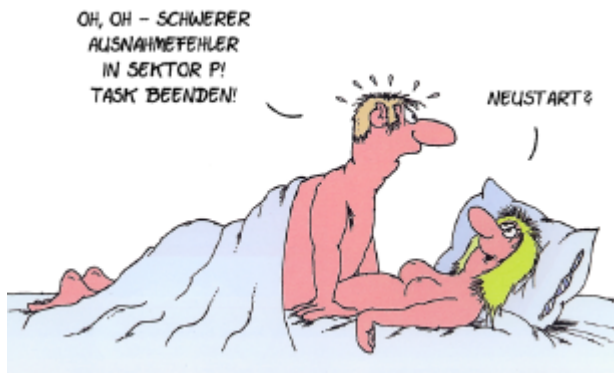


**Bild 11:** Grundlagenbegriffe für Computeranfänger (aus dem gleichnamigen Bestseller)

Worte wie *Indernett* oder *online* (**Bild 12**) haben sich eingebürgert und beweisen die Internationalität des Oberharzers. Oder wie sich beispielsweise typische Ausdrücke der Computersprache in das Liebesleben des Oberharzers einschleichen (**Bild 13**).



**Bild 12:** Begrüßungszeremonie (aus Drucksache 4711 des Bundesministeriums für Forschung und Technologie zum Umgang mit der Greencard)



**Bild 13:** Bisher unveröffentlichte Studie aus der Dokumentation: 1000 Wege zur Verhinderung der Bevölkerungsdepression im Oberharz (1999)

Ich hoffe, daß dieser geschichtliche Überblick Sie davon überzeugt hat, daß Computer eine Oberharzer Erfindung sind. Zum Abschluß lassen Sie mich noch einen eindeutigen und logischen Beweis für diese These vorstellen, in dem ich Ihnen die neuesten Forschungsergebnisse einer Panel-Studie vorlege, aus der folgende charakteristischen Merkmale des Computers festgestellt wurden:

- er funktioniert eigentlich nur, wenn er richtig unter Strom steht
- er sollte einem helfen, Probleme zu lösen, die meiste Zeit ist er aber selbst ein Problem
- die Sprache, mit denen sie sich untereinander unterhalten, ist für niemanden sonst verständlich.
- Wenn man ihm zuviel Arbeit auflädt, stürzt er schneller ab als Reinhold Messner.

**Ich sage es ja, der Computer ist ein Oberharzer.**

So, nachdem wir uns alle voller Regionalstolz gegenseitig auf die Schulter geklopft haben, wollen

wir zu dem eigentlichen Zweck des heutigen Abends kommen nach dem Motto:

Das Bier, das nicht getrunken wird, hat seinen Beruf verfehlt.

Ich darf auch dieses Bedürfnis nachhaltig an einer historischen Darstellgung erläutern (**Bild 14**).

Gezeigt wird aus der alten Kulturstätte am Wurmberg das Geheimnis der Harzer Stärke und des Durchhaltevermögens. Die Kriegerleute wurden damals mit einem stärkenden Getränk versorgt - immer alles unter Aufsicht des begleitenden Computers natürlich -, das sie mit Leichtigkeit über alle West-, Ost- und sonstige Goten siegen ließ. Fälschlicherweise wurde dieses typische Oberharzer Getränk einmal den Franzosen zugeschrieben und ein gewisser Herr Mirakulix als Erfinder benannt.

Auch dieser Zaubertrank hat sich bis heute erhalten - ebenso wie die Sitte, einmal im November seine belebende Wirkung auf Ratsherrinnen und Ratsherren, Ehrengäste und sonstige Oberharzer zu erproben. Darum möchte ich diese Rede schließen mit einem Trinkspruch:

Das Harzer Brauchtum nur gelingt,  
wenn Binding den CAROLUS bringt.

Das Bier das wir schon immer mochten  
die Einheimischen und Zugezochten,  
die Professoren und Studenten,  
die, die heute schrecklich enden,  
unsre Gäste, und sogar  
jemand aus der Stadt Goslar.

Alle, die wir hier gesessen bei dem guten Tschärperessen, schütten jetzt ein Bier darauf

**Alles Gute, Prost, Glückauf!**



**Bild 14:** Der geheimnisvolle Stärkungstrank (aus der Sammlung strategischer Vorgehensweisen zur Überwindung feindlicher Völker, Napoleon Bonaparte, 1804)

## Verallgemeinertes Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern

Betaneli, A.J.; Saginadse, N.R.

*Die konstruktionsmethodische Vorgehensweise zur Gestaltung von Produkten von der Idee zur Realisierung ist in sehr vielen Aufgabenbereichen mit nur kleinen Adaptionen sinnvoll anwendbar. Der folgende kurze Anwendungsbericht wurde an unserem befreundeten Institut für Flugzeugbau der Georgischen Universität in Tbilissi erarbeitet. In diesem Bericht wird die Anwendung auf ein sehr ergeiziges Projekt mit besonders hohem Neuerungsgrad beschrieben.*

*The application of design theories in the design process of new products from the idea to the manufacturing is almost a common tool. The following brief report on a sophisticated aeronautical vehicle was elaborated by our colleagues of the Aviation Institute from the Georgian Technical University.*

### 1 Einleitung

Beim Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte muss eine Vielzahl unterschiedlicher Probleme gelöst werden. Es liegt deshalb nahe, das Vorgehen bei einem allgemeinen Problemlösungsprozess auch auf den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess zu übertragen. Das Systemtechnische Vorgehensmodell als Problemlösungsmethodologie für künstliche Systeme gliedert zunächst den zeitlichen Werdegang eines Systems vom Abstrakten zum Konkreten in Lebensphasen /1/.

In einem systemtechnischen Vorgehensmodell wiederholen sich die Vorgehensschritte in sogenannten Lebensphasen des Systems, indem der zeitliche Werdegang des Systems vom Abstrakten zum Konkreten verläuft /2/.

Das Vorgehensmodell ist ein konsequentes aufeinander folgendes Tätigkeitsschema für die optimale Organisation des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses /3/.

Nach der VDI-Richtlinie 2221 wird der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in generelle Arbeitsschritte (Phasen zunehmender Konkretisierung = Konstruktionsphasen) aufgeteilt, die das Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren überschau-

bar, rationell und branchenunabhängig machen. Das Gesamtverfahren wird in sieben Arbeitsschritte gegliedert, aus denen entsprechend sieben Arbeitsergebnisse hervorgehen. Diese Arbeitsschritte werden je nach Aufgabenstellung vollständig, nur teilweise oder mehrfach iterativ durchlaufen. Die Arbeitsschritte können je nach Branche und Erfahrung zu einzelnen Entwicklungs- oder Konstruktionsphasen zusammengefasst werden, an denen sich auch terminliche und organisatorische Abläufe orientieren /1/.

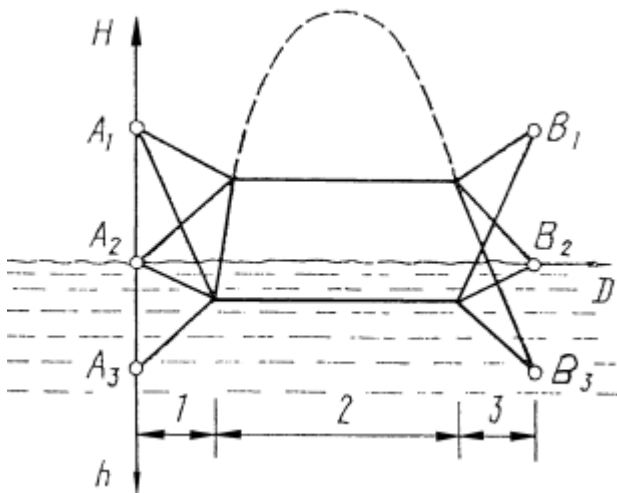
Der Mitverfasser dieses Aufsatzes hat nach /4/ ein Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern (Luftballonen, Stratosphärenballonen, Luftschiffen, Flugzeugen, Hubschraubern, Kosmoflugzeugen und Raumfahrzeugen) erarbeitet /3/.

In diesem Aufsatz wird ein verallgemeinertes Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern für verschiedene, mögliche Wirkprinzipien dargestellt.

### 2 Problemstellung

Gemäss des Vorgehensmodell /3/ muss in der Funktionsstruktur das konkrete Flugprinzip (Gesamtfunktion) formuliert werden. Der hier zu entwerfende Flugkörper soll aber nicht nur im Luft- und Weltraum sondern auch in Wasserraum einsetzbar sein. Neben der Nutzung des Konstruktionswissens für die Troposphäre, die Stratosphäre und den Weltraum, wird die Flug- und Raumfahrttechnik, vollkommen gesetzmässig, in das neue Anwendungsgebiet der Hydrosphäre übertragen. Das ist möglich dank teilweise analoger Randbedingungen: dreidimensionale Bewegungsprinzipien in Luft- und Wasserraum, Wirkprinzip der Triebwerksanlagen und der Konstruktionsprinzipien. Auf dieser Basis ist die Bewegung des aerodynamischen Flugkörpers im Wasserraum mit grosser Schnelligkeit eine neue wissenschaftlich-technische Aktivität auf dem Gebiet der Flugtechnik. Dies führt zu sogenannten in zwei Substanzen funktionierenden Flugkörpern (Zweissubstanzenflugkörper ZSF).

Die Bewegungsbahnen solcher Flugkörper sind in zwei Substanzen gültig: Wasser- und Luftraum einschliesslich Weltraum (**Bild 1**).



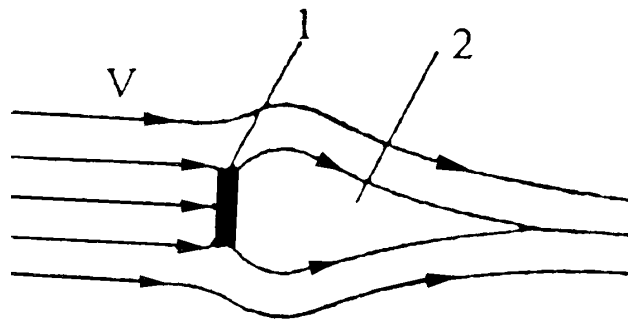
**Bild 1:** Typische Bahnkurvenstrecken der in zwei Substanzen funktionierenden Flugkörper.  
A-Startphase; B-Ziellage; 1- Startstrecke;  
2- Marschflugstrecke; 3-Zielflugstrecke

In den 60er Jahren des XX-Jahrhunderts waren solche unbemannten Flugkörper, als wirkungsvolles Mittel gegen Atom-Unterseeboote erarbeitet worden. Zweifellos werden in Zukunft auch bemannte ZSF entwickelt. ZSF können auch eine sehr wichtige wirtschaftliche Bedeutung haben (Ozeanographie, Wasserbau, grundwassergeologische Forschung, Fischerei, usw.). Hohe Geschwindigkeiten bei der Unterwasserfahrt des Flugkörpers sind durch den Kavitationsbeginn realisierbar /5,6/.

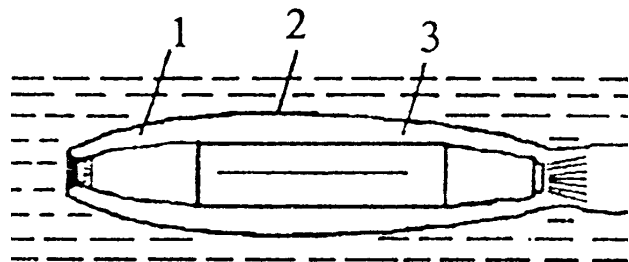
Durch den Kavitationsbeginn soll die Dichte und die Viskosität des Wasserraumes ringsum den Flugkörper vermindert werden bis der Bewegungswiderstand im Wasserraum dem aerodynamischen Widerstand in der dichten Atmosphäre gleich wird. Zu diesem Zweck muss ringsum den Flugkörper eine dünne Dampfschicht oder Schicht eines unkondensierbaren Gases entstehen. Eine solche Gas-hülle (Kaverne) kann man aus Wasser oder an Bord des Flugkörpers befindlicher Flüssigkeit bilden.

Den Kavitationsbeginn kann man durch Anwendung eines strömungsgünstigen Körpers (Kavimator), Erhitzung des Flugkörperrumpfes, Radiolyse des Wassers, Einführung in die Grenzschicht von solchen Stoffen die mit Wasser isothermisch reagieren, Polymerflüssigkeiten oder Einführung in die Grenzschicht unlöslicher und unkondensierbarer Gase verwirklichen (**Bilder 2 und 3**) /5,6/. Während einer Unterwasserfahrt, ist bei Anwendung eines

Propellertriebwerkes, die für den Kavitationsbeginn notwendige Geschwindigkeit nicht erreichbar. Dafür muss man einen Raketenantrieb anwenden. /5/.



**Bild 2:** Kavernenbildungsschema  
1-Scheibe (Kavimator); 2-Kaverne

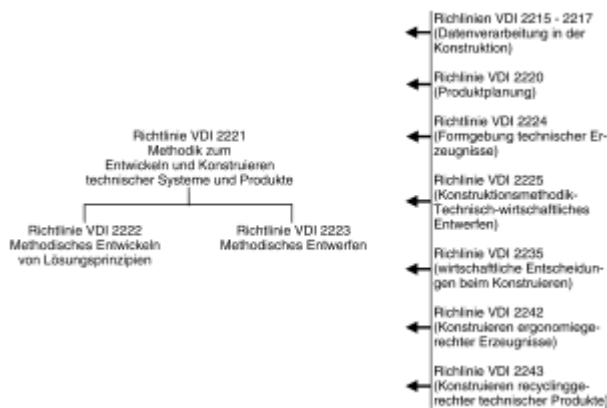


**Bild 3:** Flugkörperbewegungsschema im Wasser  
1-Gashülle; 2-Wassergrenze; 3-Flugkörper

Ziel des Vorhabens ist ein verallgemeinertes Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern für alle möglichen Wirkprinzipien zu erarbeiten.

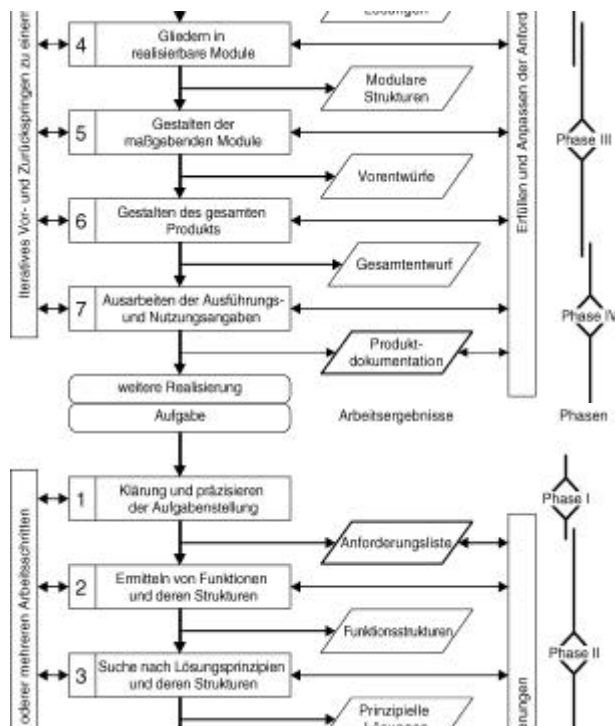
### 3 Verallgemeinertes Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern

Die Dachrichtlinie VDI 2221 /4/ strukturiert den gesamten Entwicklungs- und Konstruktionsprozess und formuliert dafür die inhaltlichen und begrifflichen Grundlagen. Die Detailrichtlinie VDI 2222 Blatt „Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien“ /7/ umfasst das „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“, das „Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen“ und das „Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen (Arbeitsabschnitte 1 bis 3)“. Die Richtlinie VDI 2223 /8/ umfasst die Phase III mit den Arbeitsabschnitten 4 bis 6. In diesem Zusammenhang sind auch die in **Bild 4** aufgeführten Richtlinien zu nennen, die den Entwurfsprozess zusätzlich unterstützen.



**Bild 4:** Einordnung der Richtlinien

Die Verfasser haben nach /3, 4, 7, 8/ ein verallgemeinertes Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern für alle möglichen Wirkprinzipien in Anlehnung an **Bild 5** erarbeitet.



**Bild 5:** Verallgemeinertes Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern mit verschiedenen Wirkprinzipien

### Arbeitsabschnitt 1

#### Arbeitsschritt 1:

Die Markt- und Kundenbedürfnisse (Flugverkehrsleistung, Raumfahrtprogramme, Umweltschutzbeschränkungen usw.) müssen unter Anwendung konventioneller oder rechnergestützter Informationssysteme festgelegt werden /3/. Die Hauptaufga-

be, d.h. die Aufgabe, zu deren Erfüllung das Produkt überhaupt konstruiert wird /7/.

#### Arbeitsergebnis 1:

Die Anforderungsliste muss als taktisch-technische Anforderungen (TTA) formuliert werden. Daraus kann die technische Aufgabe (TA) abgeleitet werden /3/.

### Arbeitsabschnitt 2

#### Arbeitsschritt 2:

Der Flug ist die Hauptfunktion des Flugkörpers. Hierüber bestimmt man in erster Linie das Flugprinzip /3/. Wenn die Flugkörper nicht nur im Luft- und Weltraum, sondern auch in Wasserraum einsetzbar sein sollen, genügt dafür nicht allein eine Betrachtung des Flugprinzips, in diesem Fall benötigt man auch ein verallgemeinertes Wirkprinzip.

Um die Funktionsstruktur in ein funktionierendes Produkt umzusetzen, muss für jede festgelegte Funktion ein physikalischer Effekt gefunden werden, mit dessen Hilfe sie realisiert werden kann /7/. Die große Geschwindigkeit der Unterwasserfahrt des Flugkörpers ist durch den hydrodynamischen Effekt der Kavitation möglich. Deswegen kann man das verallgemeinerte Wirkprinzip als technische Synthese aerodynamischer und hydrodynamischer Wirkprinzipien formulieren.

#### Arbeitsergebnis 2:

In der Funktionsstruktur muss das konkrete Wirkprinzip (Gesamtfunktion) formuliert werden.

### Arbeitsabschnitt 3

#### Arbeitsschritt 3:

Das Vorgehen ist hier identisch mit dem in /3/ beschriebenen. Zusätzlich muss für das Wirkprinzip folgendes berücksichtigt werden.

Die physikalischen Effekte sind in der Regel mit geometrischen und stofflichen Ausprägungen verbunden, die sogenannten „Effektträger“. Solche „Effektträger“ bestimmen entscheidend die gestalterische Ausprägung einer „Prinzipiellen Lösung“ als Arbeitsergebnis des dritten Abschnitts /7/.

### Arbeitsabschnitt 4

#### Arbeitsschritt 4:

Das Vorgehen ist auch hier identisch mit dem in /3/ beschriebenen. Zusätzlich ist folgendes /8/ zu berücksichtigen.



**Arbeitsschritt 4.1:** Erkennen der gestaltbeeinflussenden Anforderungen und Bedingungen.

In Arbeitsschritt 4.1 gilt es, die gestaltbeeinflussenden Anforderungen zu erkennen und sie hinsichtlich ihrer Priorität zu beurteilen.

**Arbeitsschritt 4.2:** Modularisieren der prinzipiellen Lösung.

Zunächst wird in Arbeitsschritt 4.2 geklärt, in welche Module die prinzipielle Lösung für die weitere Bearbeitung zweckmässig zerlegt werden muss. Module sind dabei hinsichtlich spezieller Gesichtspunkte abgegrenzte Gestaltungselemente.

## Arbeitsabschnitt 5

**Arbeitsschritt 5:**

Das Vorgehen ist auch hier identisch mit dem in /3/ beschriebenen. Darüber hinaus muss folgendes nach /8/ berücksichtigt werden.

**Arbeitsschritt 5.1:** Erstellung von Gestaltstudien und Vorentwürfen.

Im Arbeitsschritt 5.1 werden zu Beginn Gestaltstudien für die vorher definierten Module erstellt, in denen grobmasstäblich oder sogar unmasstäblich skizzenhaft Gestaltungsideen dokumentiert, analysiert und optimiert werden.

**Arbeitsschritt 5.2:** Beurteilen von Vorentwürfen.

Auch wenn das Beurteilen von Vorentwürfen oft unbewusst und parallel zum Gestalten stattfindet, ist es sinnvoll, in regelmässigen Abständen die gestalteten Module anhand von Kriterien aus der Anforderungsliste bewusst zu beurteilen. Um die Beurteilungssicherheit zu erhöhen, sind erfahrene Mitarbeiter hinzu zuziehen (Konstruktionskritik).

## Arbeitsabschnitt 6

**Arbeitsschritt 6:**

Das Vorgehen ist auch hier identisch mit dem in /3/ beschriebenen. Zusätzlich muss folgendes nach /8/ berücksichtigt werden.

Die Arbeitsschritte 6.1 bis 6.6 führen von den Vorentwürfen der massgeblichen Module im allgemeinen zu einem grobmasstäblichen Gesamtentwurf des zu entwickelnden Produktes, der durch Teilentwürfe (Gruppenzeichnungen) ergänzt und durch eine vorläufige Stückliste spezifiziert wird.

## Arbeitsabschnitt 7

**Arbeitsschritt 7:**

Das Vorgehen entspricht in diesem Punkt dem in /3/ dargestellten ohne weitere Ergänzungen.

### 3.1 Beispiel zur Anwendung eines verallgemeinerten Vorgehensmodells zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern

Das Beispiel ist der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess eines bemannten Zweisubstanzenflugkörpers (ZSF) mit Hilfe diskursiver und intuitiver Methoden. Dieses Beispiel wurde zunächst nur für die Phasen: „Aufgabe klären“ und „Konzipieren“ erarbeitet. Die Phasen des Entwerfens und Ausarbeitens, der oben genannten ungewöhnlichen Neukonstruktion, sind mit vielen sehr umfangreichen Detailproblemen verknüpft. Die konsequente Anwendung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses erlaubt mit fortschreitendem Verlauf eine immer fundiertere Entscheidung über die Realisierbarkeit der Produktidee.

## Arbeitsabschnitt 1

**Arbeitsschritt 1:**

Für die Umweltschutz-, die Ozeanographische- und Grundwassergeologische-Forschung ist es zweckmässig ein bemanntes ZSF zu konstruieren. Dazu wird zunächst die Anforderungsliste mit den taktisch-technischen Anforderungen (TTA) formuliert. Danach kann man die technische Aufgabe (TA) beschreiben.

**Arbeitsergebnis 1:**

Georgische Technische Universität Tbilissi		Anforderungsliste für Zweisubstanzenflugkörper (ZSF)	Blatt: 1 Seite: 1
Änder.	F W	Taktisch-technische Anforderungen (TTA)	Verantw.
		1. Geometrie	
	F	Spannweite 6,0 - 15,0 m	
	F	Länge 16,0 - 18,0 m	
	W	Flughöhe 28,0 m <sup>2</sup>	
	W	Höhe 4,0 - 6,0 m	
		2. Kinematik	
	F	Bewegungsort: Atmo- und Hydrosphäre	
	F	Höchstgeschwindigkeit M = 2,0 - 2,5	
	W	Reisegeschwindigkeit M = 1,4 - 1,7	
	W	Landegeschwindigkeit 220 - 280 km/h	
	F	Eintauchgeschwindigkeit 180 - 220 km/h	
	F	Unterwasserfahrtgeschw. 12,0 - 20 m/s	
		3. Kräfte	
	F	Rüstmasse 20.000 kg	
	F	Startmasse 35.000 kg	
		4. Energie	
	F	Raketenantrieb	
	F	Startschub 120 - 130 kN	
		5. Flug- und Unterwasserfahrtleistungen	
	F	Gipfelhöhe 30.000 m	
	W	max. Tauchtiefe 300 m	
		6. Stoffe	
	F	Kavitationshilfe - Radiolyse des Wassers	

**Bild 6:** Anforderungsliste für das ZSF

Die technischen Daten des ZSF als technische Aufgabe (TA) sind in **Bild 7** zusammengestellt.

### TECHNISCHE AUFGABE (TA) für Zweisubstanzenflugkörper (ZSF)

#### Allgemeine Angaben

Bewegungsort	Atmo- und Hydrosphäre
Besatzung	1

#### Abmessungen

Spannweite	m	8,3 - 15,8
Länge	m	16,8
Höhe	m	5,5
Flügelfläche	m <sup>2</sup>	27,3

#### Antrieb

Antriebsart	Raketenantrieb
Startschub	kN 120,0

#### Massen

Rüstmasse	kg	20.000,0
Zuladung	kg	15.000,0
Startmasse	kg	35.000,0

#### Flugleistungen

Höchstgeschwindigkeit	Machzahl	M = 2,2
Reisegeschwindigkeit	Machzahl	M = 1,6
Landegeschwindigkeit	km/h	270
Steigleistung	m/s	100
Gipfelhöhe	m	30.000
Reiseflughöhe	m	20.000

#### Unterwasserfahrtleistungen

Eintauchgeschwindigkeit	km/h	200
Unterwasserfahrtgeschw.	m/s	15
max. Tauchtiefe	m	300
Kavitationshilfe	Radiolyse des Wassers	

**Bild 7:** Technische Aufgabe (TA)

### Arbeitsabschnitt 2

#### Arbeitsschritt 2:

Für die Luftfahrt muss ein aerodynamisches Flugprinzip /3/ angewendet werden. Die grosse Geschwindigkeit der Unterwasserfahrt des Flugkörpers ist durch den hydrodynamische Effekt der Kavitation realisierbar.

#### Arbeitsergebnis 2:

Die Funktionsstruktur kann man als Synthese aerodynamischer und hydrodynamischer Wirkprinzipien formulieren.

### Arbeitsabschnitt 3

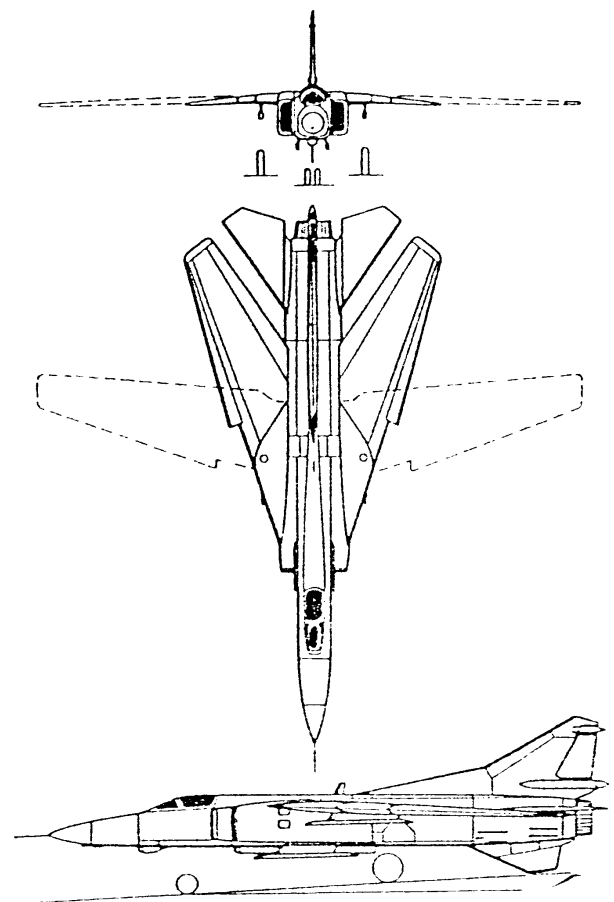
#### Arbeitsschritt 3:

Ausgehend von bestimmten Wirkprinzipien können durch die Anwendung eines zweidimensionalen

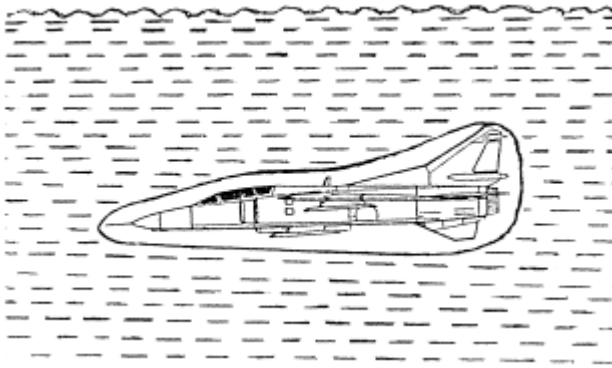
morphologischen Kastens /9/ und des Brainstormings in Übereinstimmung mit dem Gesetz des goldenen Schnittes /10/ die Proportionen und Hauptabmessungen für eine Vielfalt möglicher Lösungsprinzipien und deren Verknüpfungen erzeugt werden. Das Flugzeug soll für die Unterwasserfahrt mit teleskopisch oder fächerartig veränderbaren Flügeln ausgerüstet sein. Aus der Vielfalt von Konzeptvarianten des im Brainstormings erzeugten Lösungsfeldes, muss durch eine technisch-wissenschaftliche Beurteilung das günstigste Konzept ausgewählt werden. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise kann der Flugkörper konkret festgelegt werden. (Die Abmessungen des Flugzeuges sind in /10/ Seite 162, Bild 3 graphisch dargestellt.

#### Arbeitsergebnis 3:

In **Bild 8** ist die Gestalt des Schwenkflügelflugzeuges mit fächerartig zusammenlegbaren Flügeln für die Luftfahrt und in **Bild 9** ist die Gestalt des ZSF für Wasserfahrt dargestellt. In diesem Fall sind die fächerartig zusammenlegbaren Flügel eingefahren. Um die Kavitation auszulösen kann man die Radiolyse des Wassers anwenden. Das Festlegen des Konzeptes ist eine Grundlage für die Freigabe der Entwurfsphase.



**Bild 8:** Die Gestalt des ZSF-Flugkörpers für Luftfahrt



**Bild 9:** Die Gestalt des ZSF-Flugkörpers bei Unterwasserfahrt

- /6/ Betaneli, A.J.; Saginadse, N.R.; Sanadse, G.O.: Einführung in das Fachgebiet „Flugzeugbau“ (in georgischer Sprache), Tbilissi 1998
- /7/ VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Juni 1997
- /8/ VDI-Richtlinie 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte, März 1999
- /9/ Betaneli, A.J.; Saginadse, N.R.: Institutsmitteilung Nr. 22, IMW TU Clausthal 1997
- /10/ Betaneli, A.J.; Sanadse, G.O.: Institutsmitteilung Nr. 23, IMW TU Clausthal 1998

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

1. Nach VDI-Richtlinien VDI 2221 (Mai 1993), VDI 2222 (Juni 1997), VDI 2223 (März 1999) und /3/ wurde das verallgemeinerte Vorgehensmodell zum Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von Flugkörpern für alle möglichen Wirkprinzipien erarbeitet.
2. Das Vorgehensmodell ist ein konsequentes aufeinander folgendes schöpferisches und schematisches Tätigkeitsschema für die optimale Organisation des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses von Flugkörpern. Das Modell ist interaktiv.
3. Das Vorgehensmodell kann man auf konventionelle Methoden zur Lösungsfindung, als auch in CAD-Systemen anwenden.

Das Beispiel ist die Entwicklung, im Rahmen einer Konzeptstudie, eines bemannten Zweistubstanzenflugkörpers (ZSF). Konstruktionsart – Neukonstruktion.

#### 5 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Konstruktionslehre, Vorlesungsmanskript
- /2/ Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung, 3. Auflage, Springer 1993
- /3/ Betaneli, A.J.: Institutsmitteilung Nr. 21, IMW TU Clausthal 1996
- /4/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Mai 1993
- /5/ Belov, G.W.: Entwicklung der Flugkörper (in russischer Sprache), Moskau 1995

## Gap Analysis in Flanged Unions

Rusek, P.; Tajonar H. A.

*The industrial use of simulation tools allows us to obtain a good approach in the knowledge of the phenomena that take place in the process that is modeled. Several factors of the flange design have a direct influence on the value of the gap. The value of the gap determines the capacity of the union to contain fluids under pressure, as well as the type of sealant to be indicated. Therefore, this paper presents the analyses, made using the finite element method, of the influence of different geometric parameters in the gap value and the behavior of the gap when each parameter is modified while all other parameters are maintained constant. We expect that this paper will serve to the designer as a guide to adjust the different parameters to reach the working necessities of flanged joints.*

### 1 Introduction

One of the most important problems that faces the mechanical transmissions industry is the necessity of a perfect impermeability to internal and external media. Because of the use of new synthetic oils, the new mechanical transmissions have become a truly black box whose life exceeds the life of the vehicle (machine) in which it is integrated. The idea of a zero-maintenance and zero-service transmission during the life of the machine that contains it, generates new demands in which appears the necessity of a perfect sealing. Several specific solutions are applied to guarantee a perfect sealing, some are more sophisticated (and expensive) and some are simpler and cheaper. For the mass production industry, such as the automotive industry, the simplest and feasible solution is given through the application of a liquid sealant in the direct sealing zone. The liquid sealant after a relatively short period of time (10 minutes to 24 hours) becomes a resistant and impermeable solid. For each type of union that needs to be sealed exist a specific amount of conditions related to the preparation of the surfaces, that must be satisfied in order to reach the intention of a perfect sealing. The flange form union is widely used in mechanical transmissions. These unions have several fastener points (tighten points) that should be correctly distributed to obtain an admissible gap value between the

sealed surfaces. The liquid sealant manufactures demand, as a requisite for the correct application of their products, a maximum gap value between the contact surfaces so that the sealant capacity will not be surpassed, and guarantee a durable and high resistance gasket. The gap value between two contacting surfaces depends of several factors such as the geometric properties of the flanges (shape, roughness, waviness, flatness, etc.), elastoplastic properties of the materials involved, distribution and shape of the fasteners, and others. Considering the complexity of the work the best tool to solve the problem theoretically is the computer simulation. This paper is intended to present a possible solution in the design of flanged unions and sealing problem of mechanical transmissions through a specific simulation program and present the numerical results obtained.

### 2 Identification of the most important parameters.

In order to identify the gap value in a flanged union the parameters involved can be classified into:

- Geometric design.
- Waviness and flatness.
- Roughness and surface finish.
- Tightening sequence of the fixing points.

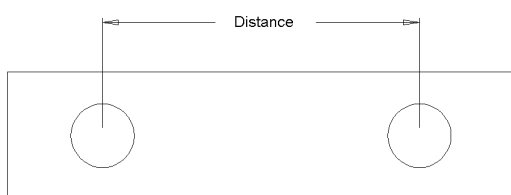
Since geometric parameters are determinant to reach a satisfactory design in which the gap value is under the acceptable sealant value, this paper only analyzes these parameters. A further analysis on other parameters must be done.

All the analyses consider an ideal surface in which waviness, roughness, etc. does not affect the gap behavior. The materials considered are aluminum (Young Modulus of 72 GPa) for the flanges and steel for the fasteners (Young Modulus of 207 GPa).

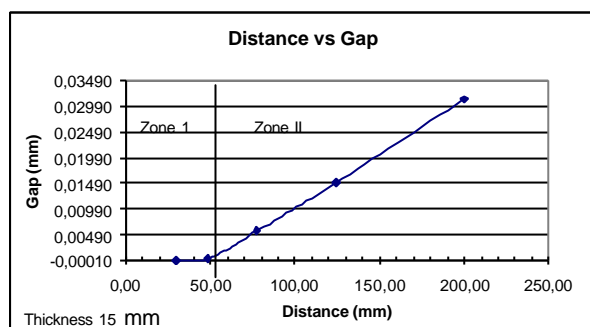
### 3 Parameter analysis

Every analysis was made changing the value of each geometric parameter while all other parameters were maintained fixed.

### 3.1 Distance between tightening points



**Fig. 1** Distance representation

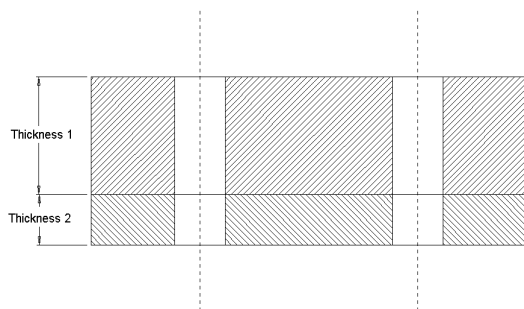


**Graph. 1** Distance vs Gap

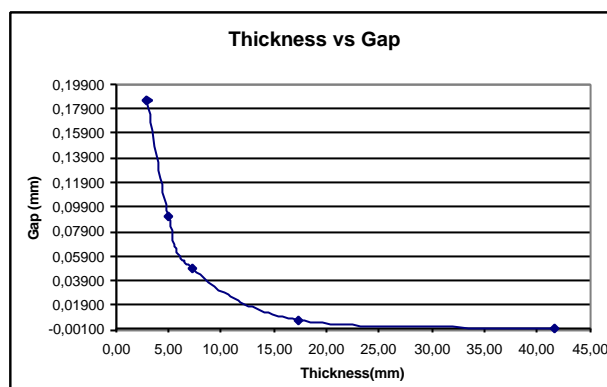
When the distance between tightening points is changed (fig. 1), a lineal behavior of the gap is observed (graphic 1). The more the tightening points are separated the greater the gap in the joint becomes.

For a specific thickness of the flange, two zones could be identified in the behavior of the gap. In the first region (zone 1) the value of the gap is zero and this value could not be changed by approaching the fasteners. The gap will increase lineally when the fasteners are moved away.

### 3.2 Thickness of the joint



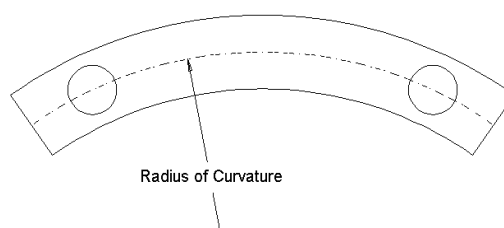
**Fig. 2** Thickness representation



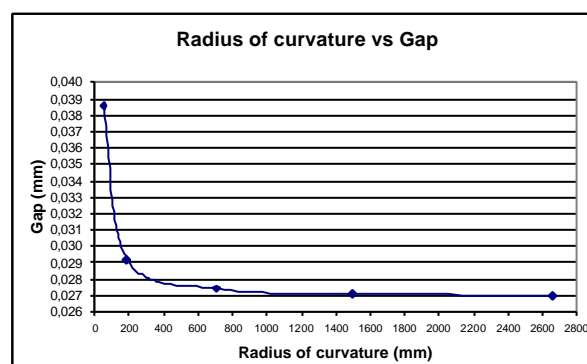
**Graph. 2** Thickness vs Gap

The thickness value in flanged unions has an important influence in the gap behavior, because a greater thickness implies a more rigid flange that minimizes the joint deformation. The behavior is exponential (graphic 2), and when a "critical" value is reached (in this case 20 mm) the gap value can be considered despicable.

### 3.3 Radius of Curvature



**Fig. 3** Radius of curvature representation



**Graph. 3** Radius of curvature vs Gap

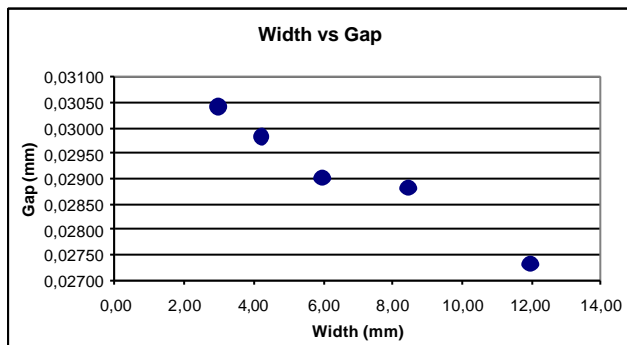
When the radius of curvature is increased the gap value decreases with an exponential behavior (figure 3). This behavior is due to the displacement of the line of action of the force out of the joint

(straight line between fasteners), therefore the force transmission would not be uniformly applied through the joint. This effect also causes a non-uniform gap distribution in the flange, this means that different gap values will be present in the axis of symmetry, with the maximum value in the exterior line of the flange.

### 3.4 Width



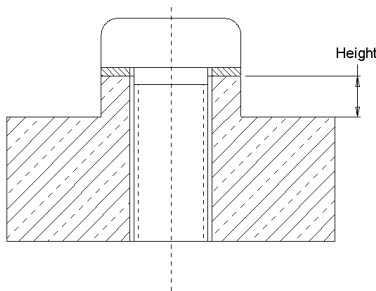
**Fig. 4** Width representation



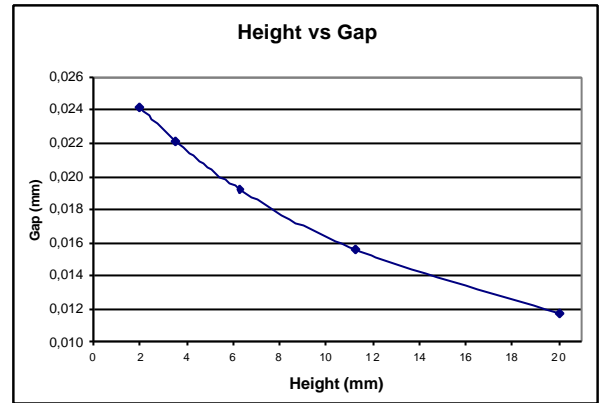
**Graph. 4** Width vs Gap

The width does not represent an important parameter on the gap behavior, because the range of variation is non significant (less than 4%). Nevertheless the width is a very important factor in the sealant selection, because of the relation of the surface with the adhesive capacity.

### 3.5 Height of fastener application



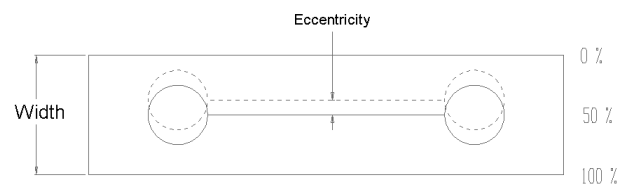
**Fig. 5** Height representation



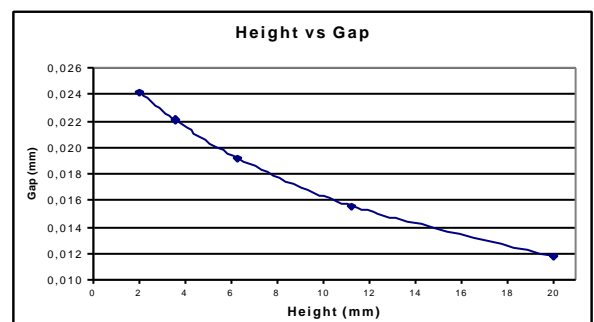
**Graph. 5** Height vs Gap

If the height at which the fasteners are placed is increased, such as a local thickness increment (figure 5), a diminution of the gap value is observed, because of the cone effect in the force distribution which helps generates a more uniform force distribution in the flange.

### 3.6 Eccentricity



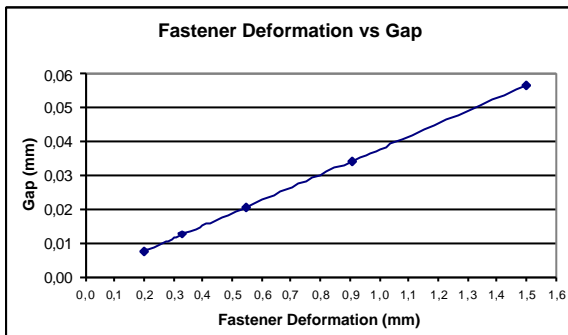
**Fig. 6** Width representation



**Graph. 6** Eccentricity vs Gap

When a certain eccentricity exists between fasteners, with respect to the middle line of the flange (figure 6), a gap diminution will be generated. Because this eccentricity approaches to the flange (symmetry line of the curved union) to the force transmission line. The influence is not significant (less than 6%).

### 3.7 Fastener Deformation (Torque applied)



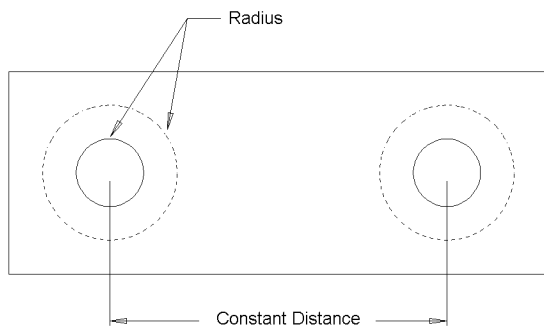
**Graph. 7** Fastener Deformation vs Gap

If fastener deformation is increased, due to an over torquing or because the maximum admissible torque of the fastener is indicated, the gap between the flanges will increase lineally (graphic 7). Therefore, for thin plates (less than 8 to 10 mm) it is convenient to apply a torque under the maximum admissible torque value to avoid an excessive flange deformation.

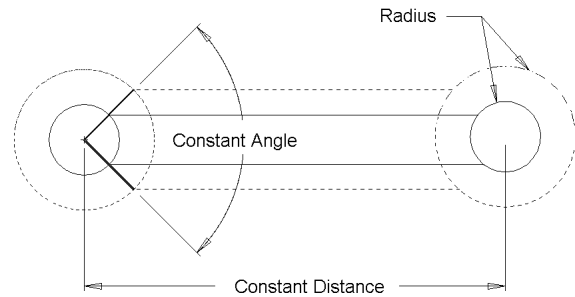
### 3.8 Bore Diameter

These analyses were made under 3 different considerations:

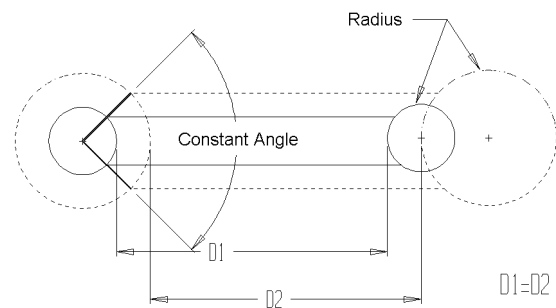
- Maintaining a constant distance between fastener points –bores– (figure 7).
- Maintaining a constant distance between bores and maintaining a constant angular relation between the bore center and the flange width (figure 8).
- Maintaining a constant flange length and a constant angular relation between the bore center and the flange width (figure 9).



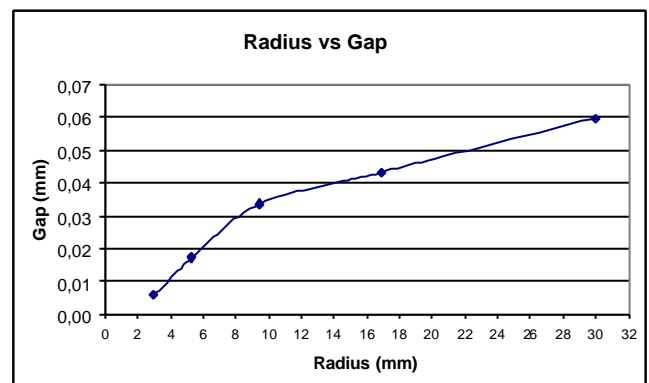
**Fig. 7** Bore Radius representation



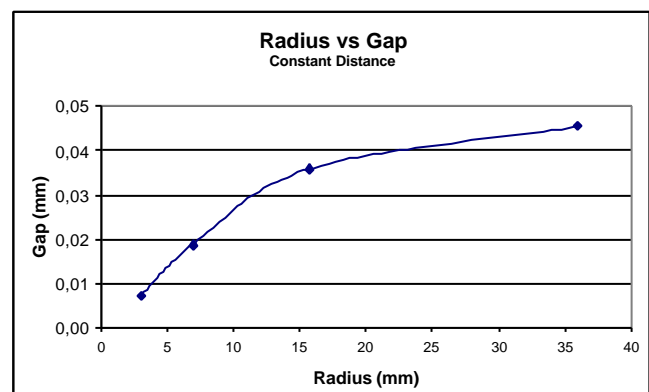
**Fig. 8** Bore Radius representation with constant distance.



**Fig. 9** Bore Radius representation with constant length.

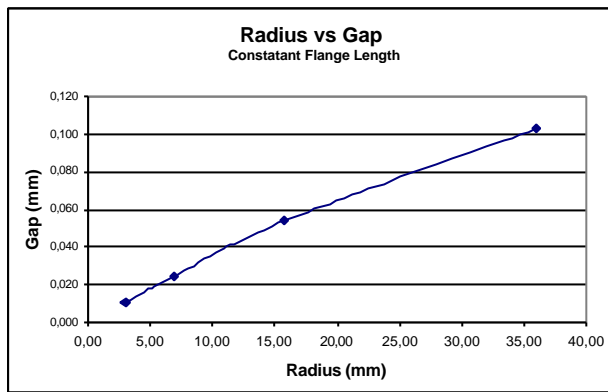


**Graph. 8** Radius vs Gap



**Graph. 9** Radius (constant distance) vs Gap





**Graph. 10** Radius (constant length) vs Gap

In the first case, a gap increment is observed when the bore diameter is increased (graphic 8), even though the flange length diminishes.

In the second case (graphic 9), a gap increment is also observed. The behavior is, as in the first case, exponential and tends to an asymptotic value.

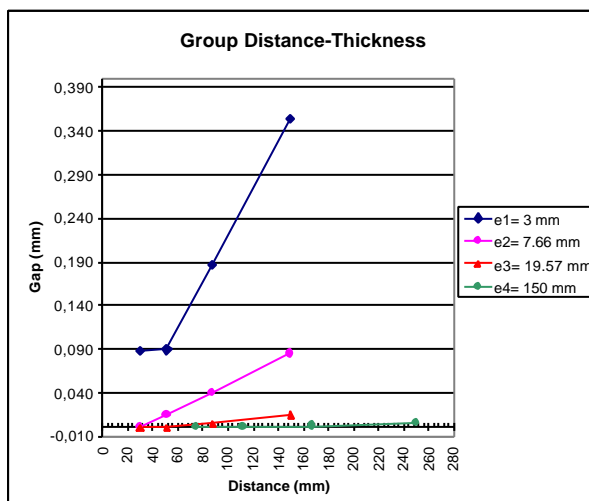
In the third case (graphic 10), the gap tends to a linear behavior when the bore diameter is increased.

#### 4 Group of curves

From the previous results, it was decided to make a group of graphics containing two parameters so that a better comprehension of the gap behavior can be reached. The groups are:

- Distance and thickness.
- Eccentricity and radius of curvature.
- Distance and radius of curvature.
- Straight flange and curved flange comparison.

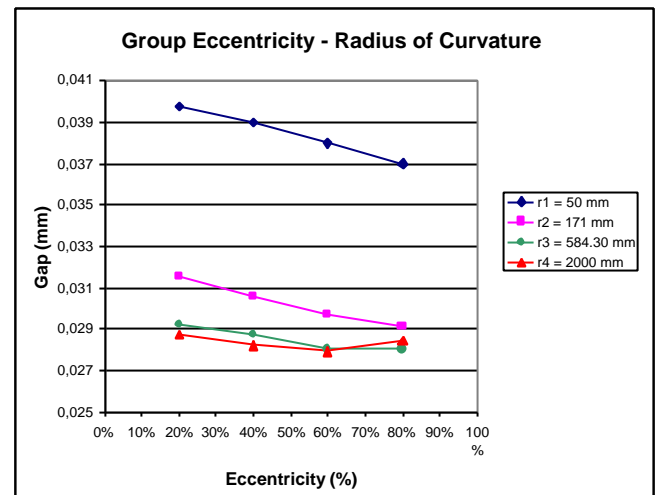
##### 4.1 Group Distance – Thickness.



**Graph. 11** Group Distance - Thickness

When the distance between fasteners is decreased and the thickness is increased, a considerable diminution of the gap value is possible. Therefore, the compensation of a wide distance is feasible by increasing the flange thickness (graphic 11). This effect is due to the increment in the joint rigidity.

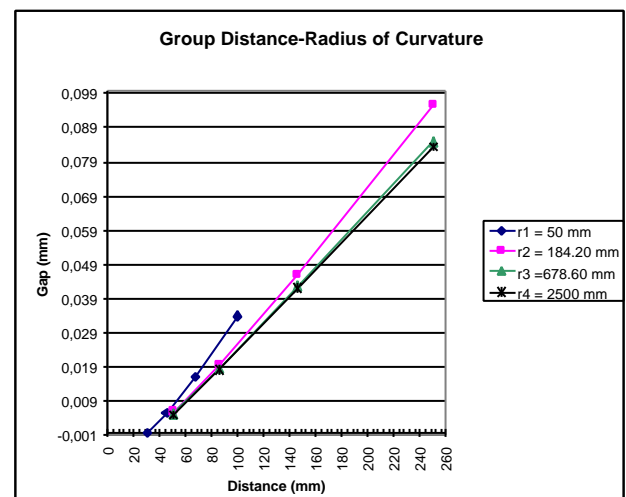
##### 4.2 Group Eccentricity – Radius of curvature.



**Graph. 12** Group Eccentricity – Radius of Curvature

In this group of curves it is observed that the lower the radius of curvature the higher the effect of the eccentricity in the gap value (graphic 12); because line of action of the force between the fasteners is approximated to the flange. If the radius of curvature is high (approaching to a straight flange) the eccentricity will increase the gap value. The influence of eccentricity is only in a small percentage (in the analyzed case only 10%).

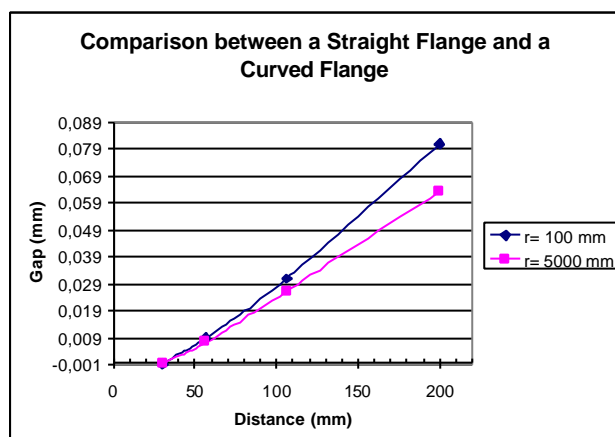
##### 4.3 Group Distance – Radius of Curvature.



**Graph. 13** Group Distance – Radius of Curvature

The influence that the radius of curvature has in the gap value as the distance between fasteners is changed is observed in graphic 13. Even though the distance is kept constant, the lower the radius, the greater the influence. This is corroborated in graphic 14. In this group, the influence of the distance is more important because it causes an appreciable change in the gap value.

#### 4.3.1 Comparison between a Curved Flange and a Straight Flange.



**Graph. 14** Comparison between a Curved and Straight Flanges.

If we compare the results of a straight flanged union with those of a curved union at the same distance between fasteners, we will notice that the influence is greater at longer distances, due to the flange separated from the ideal transmission force line.

## 5 Conclusions

The results obtained through the finite element simulation show a good concordance between the theoretical results and the practical observations. The use of the FEM (finite element method) guarantees a possible extension of the results through a more wide application fields. It also allows to avoid serious errors in the selection of parameters, which could cause high expenses and lost of time in the construction of flanged joints. Through the correct selection of design parameters it is possible to guarantee a reliable and long life sealing.

The results obtained in the numerical research show that the more significant factors in flanged unions are: the distance between fasteners, the thickness of the plates, the deformation (applied torque) of the fasteners. Other less important factors are: the radius of curvature, the eccentricity, the width (but it is an important parameter in the sealant indication).

Unfavorable gap situations could be compensated through the modification of parameter that increase the rigidity of the union, as it is shown in graphic 11, where a thickness high enough could give zero-gap even with highly separated fasteners.

The knowledge of the influence of the different parameters in flanged unions gives the designer the possibility to establish certain criteria for safe design.

## 6 References

- /1/ Blake, Alexander (1986), *Threaded fasteners*, Marcel Dekker, New York.
- /2/ Blake, Alexander (1985), *Design of mechanical joints*, Marcel Dekker, New York.
- /3/ Ritter, Karl-Heinz (1999), *Design guidelines and concepts for Zero-Gap bedplate sealing*, SAE International congress and exposition, March 1-4 1999, Paper 1999-01-0593.
- /4/ Norton, Robert (1996), *Machine Design*, Prentice Hall, N.J. USA.
- /5/ Knight, Charles E. (1993), *The finite element method in mechanical design*, PWS-KENT Publishing Co., Boston.
- /6/ Zahavi, Eliahu (1992), *The finite element method in machine design*, Prentice Hall, N.J. USA.
- /7/ Sauer, Scott, *The nuts and the bolts of specifying fastener torque*.  
[www.machinedesign.com](http://www.machinedesign.com).

## Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes

### Institut

Die Lehre, Ausbildung, Forschung und Entwicklung am Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen (IMW) deckt folgende Bereiche ab:

- Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen und Maschinenteilen
- Konstruktionssystematik
- Rechnereinsatz im Maschinenbau
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Maschinenakustik
- Experimentelle Beanspruchungsermittlung und Spannungsoptik
- Technische Normung

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus ca. 20 wissenschaftlichen Mitarbeitern/-innen aus den Bereichen Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Informatik und Geophysik. Weitere 11 Mitarbeiter/-innen und 7 Auszubildende arbeiten in der Verwaltung, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

### Technische Ausrüstung

Für die entsprechenden Forschungsschwerpunkte verfügt das IMW über gut ausgestattete Labore (Spannungsoptik, Akustik, CIM), verschiedene maschinentechnische Prüfstände und die notwendige Rechnerausstattung.

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf zwei hydraulischen Verspannprüfständen, einem Torsions-Schwingprüfstand, einem Umlaufbiege- und Torsionsprüfstand sowie einer statischen Verspanneinrichtung durchgeführt werden. Zur Prüfung förder technischer Elemente und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Eventuelle berührungslose Übertragungen von Meßwerten werden mit einer 64 Kanal Telemetrie Einrichtung bewältigt. Ein Schleuderprüfstand für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abweiseradwindsichter), ein Prüfstand für Feinprallmühlen und eine Reaktionsschwingmühle ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen.

Das Labor für statische Spannungsoptik verfügt über Einrichtungen und Werkstattinfrastruktur für span-

nungsoptische Untersuchungen an Bauteilmodellen von mikroskopischer Größe bis zu einer Größe von ca. 1 m. Die hierzu zum Teil notwendige eigenspannungsarme Bearbeitung von Modellmaterialien werden von der Institutswerkstatt sachkundig ausgeführt ebenso wie die aufgabenspezifische Anfertigung von Belastungseinrichtungen. Die technische Ausstattung des Labors für dynamische Spannungsoptik ermöglicht Messungen an hochfrequent belasteten Bauteilen. Mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers können Bauteile gezielt frequenzselektiven Belastungen bis zu einer Frequenz von 4 kHz unterworfen werden. Der Einsatz optischer Ganzfeldmeßverfahren ermöglicht darüber hinaus auch die Visualisierung sich einstellender Beanspruchungszustände, wie sie bei Stoßanregungen auftreten.

Das Akustiklabor am IMW ist mit umfangreichem Meßequipment sowie einem schallarmen Raum zur Erfassung und Auswertung des von Maschinenstrukturen abgestrahlten Schalldruck- und Schalleistungspegels ausgestattet. Neben Schmalbandanalysen mittels eines FFT-Analysators bietet ein verfügbarer Bandpaßfilter die Möglichkeit der Terz- und Oktavanalyse. Mittels eines Handschallpegelmessers können auch schnelle Vorortmessungen durchgeführt werden.

Das CIM-Labor besteht aus zwei 4-Achsen-Fräsmaschinen (MAHO MH700S/MH600), einer Drehmaschine (Monforts MNC 5), einer Senkerodiermaschine (CHARMILLER ROBOFORM 505) mit 3D-Bahnsteuerung, und einer ZEISS Koordinatenmeßmaschine mit NC-Rundtisch. Zur CAM-Lösung der Firma DLoG gehören ein werkstatorientiertes NC-Programmiersystem, Einrichtungen zur Direktübertragung von NC-Programmen an die Maschinensteuerungen und Anwendungen zur Maschinen-/Betriebsdatenerfassung sowie zur Maschinenzustandsanzeige. Als CAD/CAM-System wird SolidWorks und Pro/Engineer mit Pro/Manufacturing eingesetzt. Maschinenspezifische Postprozessoren erlauben eine durchgängige CAD/NC-Verfahrenskette. SAP R/3 wird als PPS- und PDM-System genutzt. Als weiteres PDM-System wird CADIM/EDB (Fa. Eigner+Partner) basierend auf dem Datenbankmanagementsystem ORACLE8i genutzt.

Die Rechnerausstattung umfaßt mehrere Server, die die insgesamt ca. 130 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen u.a. verschiedene Internetserver (WWW/FTP), einen Windows NT Server, einen Server für Datenbankdienste und einen Abteilungs-Server SUN Enterprise 450 zum Betrieb der 60 SUN Workstations. Als Standardsoftware stehen eine Vielzahl von Programmen zur Verfügung, u. a. die CAD-Pakete ProEngineer und SolidWorks sowie die FEM-Programme MARC/ MENTAT und ProMechanica. Zur rechnerintegrierten Produktentwicklung steht ein Intergraphcomputer auf Intel-Architektur mit zugehöriger VR-Software zur Verfügung.

### **Kooperationsangebote**

Das IMW arbeitet in einer Vielzahl von Projekten in enger Kooperation mit namenhaften Industrieunternehmen in allen Tätigkeitsbereichen zusammen:

#### *Entwicklung, Konstruktion und Fertigung*

- Entwicklung neuer Konstruktionen (z.B. Prüfstände und Mühlen),
- Gestaltung von Maschinenelementen und Maschinenteilen,
- Fertigungsmöglichkeiten für Prüfkörper und Nullserien,
- Softwareentwicklung zur Simulation und Optimierung von Fertigungsverfahren und zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses.

#### *Versuche, Messungen und Berechnungen*

- Durchführung von komplexen Festigkeitsberechnungen und -nachweisen mit Hilfe der FEM (2D/3D),
- Erarbeitung von Berechnungsansätzen für Maschinenelemente
- Schadensfallanalysen
- Vermessung und Qualitätskontrolle auf der Koordinatenmeßmaschine,
- DMS-Messungen unter Betriebsbedingungen an Maschinenteilen,
- Durchführung von maschinenakustischen Untersuchungen und Optimierungen,
- Durchführung von Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen auf den Prüfständen.

#### *Beratung und Gutachten*

- Beratung, Untersuchung und Erstellung von Gutachten zur Bauteilfestigkeit,

- Beratung, Untersuchung und Gutachten zur Konstruktion lärmarmen Maschinen,
- Beratung zu Konstruktions- und Patentfragen,
- Beratung und Hilfestellung bei der Beantragung und Durchführung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten.

Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung werden im Institut auch Entwicklungsprojekte für komplette Maschinen und Steuerungen durchgeführt. Die Zusammenarbeit kann auch über Praktika, Studien- und Diplomarbeiten erfolgen.

Neben den oben aufgeführten Angeboten bietet das Institut für Maschinenwesen interessierten Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen, Beratungen zu den europäischen Förderungsmaßnahmen an. Dies beinhaltet neben der Beratung zur Einwerbung von Fördermitteln auch Hilfestellung bei der Vorbereitung, der Durchführung und der Partner-suche bei europäischen Forschungsprojekten.

### **Forschungsschwerpunkte**

Die Forschungsschwerpunkte gliedern sich in folgende Bereiche:

#### *Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen*

Neben allgemeinen Fragen der Grundlagen des Maschinenwesens wie Beanspruchungsermittlung, Reibung, Verschleiß und Tragfähigkeit stehen folgende Maschinenelemente besonders im Vordergrund:

- Zahn- und Keilwellen-Verbindungen,
- Spielbehaltete Längsstift-Verbindungen,
- Innenhochdruckgefügte und konventionelle Pressverbindungen mit geometrischen Schwächungen (z.B. Axial- oder Radialbohrungen in Welle und/oder Nabe),
- Torsionssteife Doppelmembrankupplungen mit Ausgleichsfunktion in radialer und axialer Richtung,
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt),
- Stahldrahtseile,
- Bolzen-Lasche Verbindungen,
- Verbindungstechnik Metall-Keramik bei hohen Temperaturen,
- Verbindungselemente unter hohen mechanischen und thermischen Belastungen.

Weitere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Beanspruchungsanalyse und Optimierung stoßbelasteter Maschinenteile, mit der elasto-plastischen Beanspruchung von Maschinenelementen und der Entwicklung von Berechnungssoftware für Maschinenelemente.

#### *Konstruktionssystematik und Rechnereinsatz im Maschinenbau*

Die Entwicklung von Konstruktionsinformationssystemen zur Unterstützung des Produktentwicklers unter Einbeziehung aller Produktlebensphasen sind Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte. Als Grundlage für ein phasenübergreifendes Arbeiten stehen insbesondere die Entwicklung von Schnittstellen und der Produktdatenaustausch (STEP ISO 10303/ISO 13584) im Vordergrund. Weitere Projekte beschäftigen sich mit:

- dem Management kooperativer Produktentwicklungsprozesse,
- dem Qualitätsmanagement in der Konstruktion,
- der Werkstoffauswahl in der Konstruktion,
- der Simulation, Berechnung und Optimierung von kinematisch komplexen Fertigungsverfahren (Zahnkantenabdachungen, Wirbelfräsen),
- Fehlermöglichkeitseinfluß- und Störfallanalysen,
- dem fertigungsgerechten Konstruieren insbesondere an Bauteilen aus Feinblech.

#### *Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen*

Schwerpunkt der Untersuchungen und Entwicklungen von verfahrenstechnischen Maschinen unter besonderen mechanischen, chemischen und thermischen Belastungen sind:

- Entwicklung von Reaktionsmühlen,
- Untersuchung der Zusammenhänge beim Prallmahlen,
- Gestaltung schnell laufender Rotoren (Windsichter/Prallmühlen),
- chemisches Recycling von Kunststoffen,
- Niedertemperaturrauchgasentschwefelung,
- Entwicklung lärmarmen, schnell laufender Mühlen.

Weitere Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit KI-Systemen und der Konstruktionssystematik an Maschinen der Verfahrenstechnik und der Baureihenentwicklung.

#### *Maschinenakustik*

Im Rahmen der Maschinenakustik werden Forschungsarbeiten zur Lärminderung von Bauteilen und Maschinensystemen durchgeführt. Für experimentelle Untersuchungen und Entwicklungen zu Körperschall, Schallemission und Körperschallimpedanz- und Dämpfungselementen steht entsprechende Meßwerterfassungs- und Verarbeitungshard- und -software zur Verfügung. Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Entwicklung von Konstruktionssystematiken und von Beratungssystemen zur Konstruktion lärmarmen Maschinen.

## Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1996

### Veröffentlichungen 1996

Hartmann, D.: Modell zur qualitätsgerechten Konstruktion. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1: Konstruktionstechnik/ Maschinenelemente Nr. 260, Düsseldorf: VDI Verlag

Kruse, P. J.: Anforderungen in der Systementwicklung - Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Anforderungen in interdisziplinären Entwicklungsprojekten. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 20: Rechnerunterstützte Verfahren Nr. 191, Düsseldorf: VDI Verlag

Dietz, P.; Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. Antriebstechnik 35 (1996), Heft 4 (Teil I) und 5 (Teil II)

Dietz, P.; Ort, A.: Verwendung von Wiederholteil- und Normteilkatalogen nach ISO 13584 "Parts Library" unter Berücksichtigung der Anforderungen in der Konstruktion. VDI Berichte 1289

Dietz, P.: Concurrent Engineering - Implications for Training. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I

Dietz, P.: Considerations on the Systematic and Fully Stressed Design of Processing Technology Machines. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I

Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.: Involute Splines - Load and Wear Behaviour. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume II

Schmitt, R.; Prengemann, U.: Manufacturing Information System for the Designer. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I

Haje, D.: Knowledge Based Systems for the Development of Low-Noise Products. 4th Symposium DESIGN 96, 16.-17.5.96 Opatija, Volume I

Dietz, P.; Klemp, E.; Romann, M.: Simultaneous development of chemical process, process engineering machinery and process control systems with special reference to low temperature desulphurisation, SIMDES. European Workshop on Environmental Technologies 1996, 13.- 15. November 1996 Kopenhagen

Prengemann, U.; Schmitt, R.: Fertigungserfahrung zur Entscheidungsunterstützung in der Konstruktion, Industrie Management 1/96, Berlin, 1996 (GITO)

Neumann, U.: Konstruktionsmethodische Vorgehensweise zur Entwicklung verfahrenstechnischer Maschinen und Anlagen am Beispiel eines "Reaktionsverdichters" für das Recycling von Kunststoffen durch den Einsatz von überkritischem Wasser. Dissertation, TU Clausthal 1996

Engel, K.: Analyse der Körperschalleitung mit sensorischen, optischen und numerischen Verfahren am Beispiel von Zahnradkörpern. Dissertation, TU Clausthal 1996

Dietz, P.; Burgtorf, U.: Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 250 der FVA, Würzburg 1996

### Veröffentlichungen 1997

Dietz, P.; Kruse, P.J.; Leschonski, K.: Behandlung von Anforderungen in der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen. Konstruktion, Heft 1/2, Januar 1997

Dietz, P.; Penschke, St.; Ort, A.: Ansätze zur parallelen Gestaltung von Produkten und Fertigungsprozessen. VDI Berichte 1322

Dietz, P.; Ort, A.: The Use of ISO 13584 Methodology for Building Part Hierarchies in Practice. European Conference Product Data Technology Days, 15.-16.4.1997, Sophia Antipolis

Dietz, P.; Penschke, St.; Ort, A.: Strategies for Product Knowledge Management and Feedback to Design - Application Examples. Workshop Product Knowledge Sharing and Integration, 17.-18.4.1997, Sophia Antipolis

Dietz, P.; Ort, A.; Penschke, St.: Perspectives on Design Support Strategies. IIM '97 European Conference on Integration in Manufacturing, 24.-26.9.1997, Dresden

Jakel, R.: Ein Beitrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, angewendet am Beispiel eines keramischen Heißgasventilatorrades. Dissertation, TU Clausthal 1996.

Haje, D.: Entwicklung eines Informationssystems zur Konstruktion lärmarmen Produkte. Dissertation, TU Clausthal 1996, Lärmarm konstruieren XVII, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung Fb 768 Arbeitsschutz, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW

Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentenbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente Nr. 286, Düsseldorf: VDI Verlag

Dietz, P.; Burgtorf, U.: Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 250 der FVA, Würzburg 1997

Dietz, P.; Klemp, E.: SIMDES. European Workshop on Environmental Technologies 1997, 10.- 12. Dezember 1997, Cranfield GB

Schiedeck, N.: Simulation und Optimierung kinematisch komplexer Fertigungsverfahren. Dissertation, TU Clausthal 1996.

### Veröffentlichungen 1998

Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: A comparison of hazard analysis methods in plant design. 1st Internet Conference on Process Safety, Januar 1998

Dietz, P.; Ort, A.: The Concept of View in Parts Library – An Integrative Feature For The Design Process? European Conference Product Data Technology Days, 25./26.3.1998, Garston (Watford).

Dietz, P.; Ort, A.: Festlegungen für die optimale Merkmalerfassung und -organisation in einem Merkmallexikon. DIN Tagung "Merkmal-Lexikon in der Anwendung", 2.4.1998, Köln.

Dietz, P.; Wesolowski, K.; Burgtorf, U.; Garzke, M.: Betriebszustände und Tragfähigkeitsnachweis von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. VDI-Tagung "Welle-Nabe-Verbindungen", 28./29.4.1998 Fulda VDI Berichte 1384

Dietz, P.; Tan, L.; Garzke, M.: Übertragungsfähigkeit und elastisch-plastische Auslegung geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. VDI-Tagung "Welle-Nabe-Verbindungen", 28./29.4. 1998 Fulda, VDI Berichte 1384

Burgtorf, U.; Dietz, P.; Garzke, M.: Calculation of Involute Splines under Elastic Material Behaviour. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Garzke, M.; Dietz, P.; Tan, L.; Schäfer, G.: Transmission capabilities and elastic design of weakened shaft-hub shrink fits. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Ort, A.; Dietz, P.: Parts Library: An Application of Meta-Modelling in Design. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Dietz, P.; Penschke, S.; Ort, A.: Strategic Reuse of Product Data for Design. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Garzke, M.: Abschlußbericht zum DFG-Vorhaben "Statische und dynamische Beanspruchbarkeit von Zahnwellen-Verbindungen unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten", Di 289 / 9-2; Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1998.

Gieleßen, H.: Optische Anisotropie von texturiertem Silberchlorid. Dissertation, TU Clausthal 1997.

Dietz, P.; Ort, A.: Knowledge Representation in Design Using Parts Library. ProStep Science Days, 17./18.6.1998, Wuppertal.

Penschke, S.: Erfahrungswissen in der Produktentwicklung. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Schmidt, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur konstruktiven Einflußnahme auf die Körperschalleitung in ebenen Strukturen. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Burgtorf, U.: Montage- und Betriebseigenschaften von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Heinen, F.: Entwicklung einer Methodik zur Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Dietz, P.; Schäfer, G.; Garzke, M.: Elastisch-plastische Auslegung von Maschinenelementen. 2. Workshop Konstruktionstechnik, 24./25.9.98 Kühlungsborn, Institut für Konstruktionstechnik der Universität Rostock.

Dietz, P.; Schmidt, A.; Jeschke, D.: Berechnung von Terzspektren aus der FFT-Analyse. Zeitschrift für Wärme-, Klima-, Schall- und Brandschutz. 43. Jg., Heft 41

Pawar, K.S.; Ratchev, S.; Heimannsfeld, K.: Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (KARE) in one-of-a-kind production environment: Initial Concepts, current and future development. Conference PROLAMAT, September 1998, Trento/Italien.

### Veröffentlichungen 1999



Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz. Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1999.

Dietz, P.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmer Produkte – Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur. Konstruktion 51 (1999), Heft 7/8.

Schmidt, A.: Untersuchungen zur konstruktiven Einflußnahme auf die Körperschalleitung in ebenen Strukturen. Konstruktion 51 (1999), Heft 7/8.

Dietz, P.: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen. Konstruktion 51 (1999), Heft 10.

Dietz P.; Grünendick T.: Reaktives Mahlen mit Hochleistungs-Schwingmühlen. Workshop Tribochemie/Reaktives Mahlen, 26.6.1999, DECHEMA e.V., Frankfurt

Dietz, P.; Käferstein, B.; Schmidt, A.: Optische Ganzfeldmeßmethoden und Analogiebildung zur Simulation der Körperschallausbreitung. VDI-Tagung "Maschinenakustik", 9./10.9.1999 Wiesloch, VDI Berichte 1491

Dietz, P.; Gummersbach, F.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmer Produkte - Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur. VDI-Tagung "Maschinenakustik", 9./10.9.1999 Wiesloch, VDI Berichte 1491

Klemp, E.; Hickmann, T.: Rapid Tooling für Serienwerkzeuge? - Ein Test im Vergleich zu herkömmlichem Stahl. Der Stahlformenbauer 16 (1999), Heft 5.

Dignum, V.; Heimannsfeld, K.: Knowledge Management for requirements engineering. 12th Banff Knowledge Acquisition Workshop for knowledge-based systems, Volume 1, Banff, Canada, 1999

## Veröffentlichungen 2000

Schäfer, G.; Birkholz, H.; Garzke, M.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Membrankupplungen. AiF-Abschlussbericht, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, April 2000

Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. Dissertation, TU Clausthal 1999.

Schäfer, G.; Dietz, P.: Strategies for the Design of Process Engineering Machines under special mechanical, thermal and chemical Conditions. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Dietz, P.; Haje, D.: Development of low noise Products – Computer guidance for the Designer. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Birkholz, H.; Dietz, P.; Dehner, E.; Garzke, M.: TWINTORS-Diaphragm couplings for turbo machines. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Garzke, M.; Dietz, P.: Torque transmission capability of internal high pressure assembled press fits. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Otto, S.; Dietz, P.; Garzke, M.: Development of calculation basis for dimensioning axial pin connections with clearance. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Ort, A.: Entwicklungsbegleitende Kalkulation mit Teilebibliotheken. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Dietz, P.; Garzke, M.; Schellbach, J.: FEM-Analyse innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen. 1. MSC-Technologie-Konferenz, 5./6.6.2000, Bad Kissingen.

Rouibah, K.; Schmitt, R.; Caskey, K.; Goltz, M.: The SIMNET Parameter Based Approach Eases Inter-Company Engineering Change Management. International Conference on Concurrent Enterprising – ICE 2000, 28.-30.6.2000, Toulouse.

Heimannsfeld, K.; Johnson, J.; Herzog, E.; Düsing, C.: Beyond Tool Exchange – Current Status and Future Implications of the Emerging ISO Standard AP233. 2<sup>nd</sup> European Conference on Systems Engineering (EuSEC 2000), Sept.2000, München.

Goltz, M.; Schmitt, R.: Product Data Controlled Workflow in the Supply Chain. ProSTEP Science Days 2000.

Goltz, M.; Schmitt, R.; Vanden Bossche, M.: Managing the Development and Engineering Changes of Complex Products in a Distributed Engineering Environment. eBusiness and eWork 2000. 18.-20.10.2000, Madrid.

Dietz, P.; Tan, L.; Schäfer, G.; Garzke, M.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen. Seminar „Welle-Nabe-Verbindung: Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 24./25.10.2000, Chemnitz

## Autoren

*Backhaus, Stefan:* Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.6.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. backhaus@imw.tu-clausthal.de

*Beisheim, Nicolai:* Jahrgang 1969, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, vom 1.1.1998 bis zum 31.12.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Reibungstechnik und Maschinenkinetik der TU Clausthal, seit 1.1.1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. beisheim@imw.tu-clausthal.de

*Betaneli, Archil:* Jahrgang 1925, Professor für Flugzeugbau an der Georgischen Technischen Universität Tbilissi (Georgien), im Rahmen der Kooperation mehrfacher Gast am IMW.

*Birkholz, Hagen:* Jahrgang 1967, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.9.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. birkholz@imw.tu-clausthal.de

*Bönig, Sabine:* Jahrgang 1969, studierte Maschinenbau an der TU Braunschweig und Verfahrenstechnik an der TU Clausthal, seit 1.5.1997 wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMW.

*Dietz, Peter:* Jahrgang 1939, studierte Maschinenbau an der TH Darmstadt, wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebe der TH Darmstadt, Promotion 1971 über die Berechnung von Seiltrommeln, seit 1974 Leiter der Stabstelle Konstruktionssysteme der Pittler Maschinenfabrik AG, Langen, seit 1977 dort Leiter der Entwicklungsabteilung, seit 1.10.1980 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW. dietz@imw.tu-clausthal.de

*Düsing, Carsten:* Jahrgang 1972, studierte Geophysik an der TU Clausthal, seit 1.2.1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. duesing@imw.tu-clausthal.de

*Garzke, Martin:* Jahrgang 1969, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.1.1996 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. garzke@imw.tu-clausthal.de

*Goltz, Michael:* Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. goltz@imw.tu-clausthal.de

*Große, Andreas:* Jahrgang 1969, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, Promotion im September 2000 über interdisziplinäre Werkstoffauswahl durch Aufbau eines Material Data Mart. grosse@imw.tu-clausthal.de

*Grünendick, Torsten:* Jahrgang 1967, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München, von 1993 bis 1996 Fachgruppenleiter bei einem Luftfahrzeugtriebwerks - Instandsetzer in Erding, ab 1996 dort Leiter Qualitätssicherung, seit 1.8.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. gruenen@imw.tu-clausthal.de

*Gummersbach, Frank:* Jahrgang 1965, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.6.1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, Promotion im April 2000 über schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten. gummer@imw.tu-clausthal.de

*Heimannsfeld, Klaus:* Jahrgang 1968, studierte Informatik an Universität Fridericiana (TH) in Karlsruhe, seit 1.5.1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, Promotion im Oktober 2000 über modellbasierte Anforderungen in der Produkt- und Systementwicklung. klaus-jun@heimannsfeld.de

*Käferstein, Berthold:* Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. kaefer@imw.tu-clausthal.de

*Klemp, Eric:* Jahrgang 1966, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.7.1995 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. klemp@imw.tu-clausthal.de

*Müller, Dirk:* Jahrgang 1969, studierte Technomathematik an der TU Clausthal, seit 1.1.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. dmueller@imw.tu-clausthal.de

*Mupende, Ilaka:* Jahrgang 1964, studierte allgemeinen Maschinenbau an der Universität Kinshasa, Demokratische Republik Kongo, seit 1.10.1996 Gastwissenschaftler am IMW. mupende@imw.tu-clausthal.de

*Otto, Steffen:* Jahrgang 1971, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.8.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. otto@imw.tu-clausthal.de

*Schäfer, Günter:* Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.89 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, seit 1991 akademischer Rat, Promotion im November 1995 über Verschleiß und Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen.

[schaefer@imw.tu-clausthal.de](mailto:schaefer@imw.tu-clausthal.de)

*Tajonar, Antonio:* Jahrgang 1975, studierte Electromechanical Engineering an der Universidad Panamericana in Mexico City, seit 1.10.2000 Gastwissenschaftler am IMW. [htajonar@tu-clausthal.de](mailto:htajonar@tu-clausthal.de)

*Tawil, Mohamed:* Jahrgang 1969, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW.

[tawil@imw.tu-clausthal.de](mailto:tawil@imw.tu-clausthal.de)

*Trenke, Detlef:* Jahrgang 1969, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.10.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. [trenke@imw.tu-clausthal.de](mailto:trenke@imw.tu-clausthal.de)

*Wächter, Martina:* Jahrgang 1959, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1985 wissenschaftlicher Mitarbeiterin am IMW. [waechter@imw.tu-clausthal.de](mailto:waechter@imw.tu-clausthal.de)